

高等學校教學用書

工程熱力學

第一冊

A. M. ЛИТВИН 著
甯 梲 徐華舫 譯

高等教育出版社

高等學校教學用書



工 程 熱 力 學

第一冊

A. M. 李特文著

甯 梲 徐華舫譯

高 等 教 育 出 版 社



本書係根據蘇聯國營動力出版社(ГОСУДАРСТВЕННОЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО)出版的李特文(А. М. ЛИТВИН)著“工程熱力學”(ТЕХНИЧЕСКАЯ ТЕРМОДИНАМИКА)第二版譯出。經蘇聯高等教育部審定為高等動力工業學校熱力工程專業的教科書。

本譯本分三冊出版。第一冊由北京航空學院竇槐、徐華舫同志翻譯。

本書原由龍門聯合書局出版,現轉移我社出版,用該局原紙型重印。

2PB7/16

工 程 熱 力 學

第一冊

A. M. 李特文著

竇槐等譯

高等教育出版社出版

北京琉璃廠一七〇號

(北京市書刊出版業營業許可證出字第〇五四號)

上海大新印刷廠印刷 新華書店總經售

書號 15010·378 開本 850×1168 1/32 印張 6 11/16 字數 137,000

一九五三年九月龍門聯合書局初版

一九五七年一月新一版

一九五七年一月上海第一次印刷

印數 1-1,500

定價(10) 1.00

序 言

約從十八世紀中葉起，人類許久以來的企圖，利用熱能以取得機械能的企圖，得以實現了。俄羅斯的И.И.包爾蘇諾夫(1723—1766)，稍後英國的瓦特(1736—1819)都造成了蒸汽機——發動機，這種發動機的機械能是利用燃料燃燒時所放出來的熱能產生的。

人們開始利用機械能，使工廠中的機器體系(工具機)運轉起來。

這樣，便產生了第一批熱力發動機。後來，設計的念頭又產生了內燃發動機，這種發動機的燃料是在發動機汽缸內進行燃燒的，而在蒸汽機器方面又出現了蒸汽渦輪(拉伐爾 1845—1913年)，這種機器迅速地獲得廣大發展。

近年來，燃氣渦輪機已經走出了試驗階段，開始在工業上應用了，噴射式發動機則用在特殊的目的上。

熱力發動機的出世，使自然界大量的力能資源，各種燃料的礦藏——煤、石油、頁岩、泥炭、天然煤氣等等，得以為人廣泛利用，以發揮機械能。由於最近科學的發現，人類現在已經站在解決應用原子能的問題面前了，這種能的蘊藏量，隨科學的進展，可能超過人類直到現在為止所已掌握的一切能。

在整個十九世紀裏，工業上所用的機械能，主要的得自熱力發動機。這種形式的能，缺點在於難以作長距離的傳輸。長距離傳輸所應用的傳輸用具太笨重，不方便，而且由於損失太大，也不經濟。因此，它所能傳到的地區便十分有限了。

利用熱能及熱力發動機最重要的推進力在廿世紀出現，這就是電

機的出現，及其大量應用，這種機器把機械能轉變為電能，或把電能轉變為機械能；用電能供應工具機器的需要，因為它傳輸方便，用起來比機械能方便得多。

自然界有大量的各色各樣的燃料礦藏，一方面，利用熱力機械能（電能）的機器在構造上有巨大的成績，另一方面，迅速建立起大量的火力發電站來，這種火力發電站完成人們所需要的熱能變為機械能的轉變，並進一步將機械能變為電能。

利用熱以獲得機械能早就引起物理學家的注意了。十九世紀中葉，焦爾、邁耶、黑爾姆厚茨、卡諾、克勞西烏思諸人觀察了熱的現象及熱機的工作，建立了熱力學第一和第二兩定律，這兩條定律是研究熱能與機械能互變的，是工程熱力學的基本定律。

工程熱力學主要是研究物理現象，即與分子改變無關的現象。

近年來，工程熱力學的範圍擴大到把化學現象也包括進去了，例如燃燒現象及物質溶解的現象。

所以，工程熱力學所研究的是化學能、熱能和機械能的相互變換，觀點主要的放在工程實用問題上。這樣的一門科學，是那研究熱能及其特性的稱為熱力學的總科學中的一個分支。

差不多一直到前一世紀的中葉，科學始終把熱看作是一種特殊的、無重量的、不生不滅的東西——稱為熱素。但，由觀察熱力現象得到的一系列事實，最重要的是做功時所生的熱，打破了對於熱能本質的這種看法，終於拒絕了熱素的理論，而建立起對於熱能本質的新觀念。克勞西烏思、麥克思衛和凱爾文的研究指出，熱的本質是和組成物體的分子運動動能有直接關係的（註）。

這種熱力本質的觀念的發展，產生出一門新科學——熱的運動學說，這一理論和物體構造的科學——分子學說，二者合成一套整體的科

學世界觀——物體的分子運動學說。

工程熱力學可以用嚴格的公式來敘述。這種敘述的方法就是用數學式子研究熱力學兩條定律，這兩條定律，前面已經說過，是純粹根據實驗方法樹立的。這種方法有它許多方便之處，但缺點是不能給所要研究的現象以物理意義，它的最終結論在方法論方面往往引到不正確的方向上去。從物質構造的觀點去看問題，結果，對物質的了解以及從物理方面對熱力學諸定律的了解，得到科學的根據。祇有這樣，這些定律才會清楚，這種清晰性在作形式的敘述時是沒有的。

根據以上所說，可見全部工程熱力學中的熱力工程計算都是以熱力學中的兩條定律為依據的，而在解釋物性及上述兩定律的本質時，則利用關於物質構造的數據。這一點，在本書中是以入門的形式介紹出來的，這正合乎本書的目的。

註：首先拒絕熱質理論的諸人中，羅蒙諾索夫在內。在他的文章[論固體物與液體物] (Рассуждение о твердости и жидкости тел, 在 1760 年的科學院大會上作的報告)裏，他說：“我首先說明，阿里斯多德之火，或者按某些新學者的說法，所謂特殊的熱質，說這種熱質是由一個物體走入另一個物體，這是完全沒有道理的，這種說法完全是虛構的，我斷言火和熱就是構成物體的微小部份的旋轉運動，特別是物質本身的旋轉運動”（引自科學院出版的[羅蒙諾索夫傳略]）。

二 版 原 序

本書初版問世以來，已經十年了，在這十年裏，動力工程方面有很大的進展。

首先必需指出，人們在技術上努力使工質處在高參數值（譯按，指高溫高壓等）下工作，以提高熱能轉化循環的效率，並更好的利用熱能傳遞器械的受熱表面。溫度的提高，促使我們在做熱力計算時，首先是在計算燃燒過程時，由利用往往不大可靠的經驗數據，轉向研究現象本身的內在機構。

研究壓氣機中壓縮過程所獲得的成果，使在構造上更合理的壓氣機得以出世。這就在技術上開闢了使用一種新發動機的道路——燃氣輪機，同時還有噴射式發動機。

理論研究的結果，其中主要是蘇維埃科學家的成績，使蒸汽方面及理想氣體的比熱出現了新的標準數據。

作者在這本二版書中，努力把這些情況介紹出來，為此，本書曾作了相當多的修改，並增添了一些新的章節。

其中必需指出，有新加的兩章是闡述熱力學第一定律和第二定律在化學反應上的應用的。在這之前，還增添了一節講燃燒時基本關係的材料。

關於氣體受壓縮和蒸汽受壓縮的問題，單列入一章，其中增添了多級壓氣機、渦輪壓氣機以及蒸汽引射壓縮器的熱力學工作原理。

燃氣輪那章是重新寫過的，其中包括噴射式發動機工作循環的分析。關於蒸汽動力廠回熱循環的篇幅大大擴充了。

在一切場合下，講的不是理想循環，便具有內部損失的循環。無論研究哪種循環，都用解析法和圖線法，特別是利用 Ts 圖線。

全書整個修改了一遍，有些地方刪除了一些材料，或精簡了一下。所以總篇幅幾乎沒有變動。

課程總的組織以及材料的安排，也有相當的變動。

全部例題和習題都重新審查過了，其中有一部份刪除了，也有一部份用新的題目替換了。

全部插圖材料重新編過。

爲了自學方便（如函授），書中字體分大小兩種。小號字體的材料可以在第二遍才去精讀。一切例題和習題也都排成小號字。

除了熱力工程方面的專業之外，本書也適於許多別種專業的教學大綱，主要的是高等技術學校的機械-力能專業。

作者認爲必需對下列諸人表示謝忱：莫斯科力能研究院 M. П. 吳卡羅維赤教授，莫斯科航空學院 A. B. 瓜斯尼可夫教授，他們兩位在校閱原稿時，提供了許多寶貴的意見，此外，還得感謝全蘇工業函授學院的 Я. M. 魯濱斯坦教授，他仔細地校閱過本書。

目 錄

二版原序.....	1
序言.....	1

第一章

工 質 及 其 計 算 法

1-1 基本概念及定義.....	1
1-2 氣體狀況諸參數.....	5
1-3 理想氣體的諸定律.....	23
1-4 燃燒的基本關係式.....	51
1-5 混合氣體.....	58

第二章

氣 體 的 比 熱

2-1 比熱的計算法。 定值比熱	75
2-2 變值比熱。 平均比熱及真實比熱。 比熱的數值表.....	90
2-3 混合氣的比熱.....	104

第三章

熱力學第一定律及其在物理狀況變化過程上的應用

3-1 能量不減定律。 熱能與機械能當量。 度量單位.....	111
3-2 研究方法及其基本定義.....	115

3-3 氣體功的計算法	123
3-4 熱力學第一定律的解析式子	125
3-5 氣體狀況的變化過程。定容下氣體狀況的變化	127
3-6 內能以及理想氣體的熱力學第一定律的方程	130
3-7 等壓下氣體狀況的變化	134
3-8 氣體的熱焓	138
3-9 氣體狀況的等溫變化	145
3-10 氣體狀況的絕熱變化 ($c_v = \text{常數}$)	149
3-11 變值比熱下 ($c_v \neq \text{常數}$) 理想氣體的絕熱變化	161
3-12 多變過程中氣體狀況的變化 ($c_v = \text{常數}$)	166
3-13 多變過程 ($c_v \neq \text{常數}$)	181

第 四 章

熱力學第一定律用於有化學反應的狀況變化過程

4-1 基本概念及定義	191
4-2 有化學反應的過程中，熱力學第一定律的方程	193
4-3 反應的熱效應。燃燒的發熱量	194
4-4 蓋斯定律	198
4-5 基爾希浩夫定律	199

第一章

工質及其計算法

1-1 基本概念及定義

在熱機裏，熱能轉變為機械能是利用媒介物質來實現的，這種媒介物質稱工質。

就物理屬性來說，氣態物質是最合適的工質，同時，在已知的三種物態中，氣態又是最簡單的。

凡是我們看得見的，可以用簡單辦法很容易度量的一切自然物體都是大的物體，或稱大物。這種大物體在運動時所具有的能是機械能。

一切大物體都是由微小粒子——分子所組成的，分子則由原子組成。這些東西都不是看得見的，都不能用普通的方法度量尺寸的，稱為微物。

氣態物質的分子及原子處在不斷的不規則運動狀態中，彼此時而接近，時而分離，在經常碰撞着，這種運動便是熱能的本質。這種運動的特性，我們可以從它的一系列現象（蒸發，熱傳導，融化）去推斷，它是決定於物體的熱力狀態的；因此，分子及原子的不規則運動稱為熱力運動。

分子之間有內聚力在作用。

大量分子的不規則運動，其中沒有一個方向可以說是主要的，結果表現為氣體的如下的性質：

(1) 氣體給予容器四壁的壓力是到處相等的;

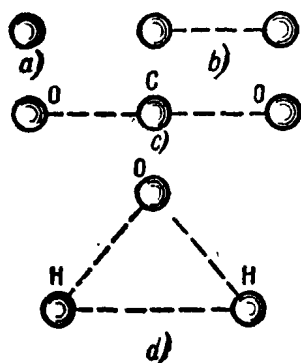
(2) 氣體均勻地佈滿它所佔領的全部容積。

第二條性質，在說到混合氣體時，可以這樣寫：如果彼此之間不能起化學作用的某幾種氣體放在同一容器裏，則由於熱力運動的結果，它們必混成一種均勻的混合氣。

氣體，按它的分子所包含的原子數，可分為單原子氣體、雙原子氣體、三原子氣體及多原子氣體。

為我們的目的，關於原子和分子，祇要弄清下列各項觀念已經夠了。

原子是一種有彈性的小球，它的全部質量都在這個小球裏(第 1-1 圖 a)。



第 1-1 圖

連結(化合)兩個原子成為一個雙原子的分子，這時原子的排列成啞鈴狀(第 1-1 圖 b)，由於分子內部有力，使它得以保持這樣的形狀。三原子或多原子的分子，各由三個原子或多個原子組成，彼此之間有一定的排列。原子作直線排列的話(如 CO_2)，則稱直線分子(第 1-1 圖 c)，別種排列法(如 H_2O)稱非直線分子(第 1-1 圖 d)。

分子的成份從它的化學公式上可以看出來。

在熱力學的計算上，分子最重要的特性是它的分子量，分子量代表組成分子的全部原子的重量(原子量)的總和。原子量是一個抽象的數字，它代表原子的質量。所以，要計算分子量必需知道氣體的化學公式以及組成分子的各元素的原子量。第 1-1 表裏列舉了熱力學計算中常遇見的某幾種氣體的化學公式。

在研究一些複雜的物理現象時，往往不得不把它劃分為若干簡單

第 1-1 表

氣 體 名 稱	化 學 公 式	氣 體 名 稱	化 學 公 式
氫	H_2	苯	C_6H_6
氧	O_2	甲烷	CH_4
一氧化碳	CO	甲醇	CH_3O
氮	N_2	硫化氫	H_2S
二氧化碳	CO_2	乙烯	C_2H_4
二氧化硫	SO_2	丁烷	C_4H_{10}
水蒸汽	H_2O	己烷	C_6H_{14}
氨	NH_3	乙烷	C_2H_6
乙炔	C_2H_2		

的現象，研究其中一部份現象，同時所研究的對象，在一定的條件下，它的性質和實際存在的物體確是很近的。所以我們在研究運動時，往往把摩擦除外——由此得出絕對光滑物體的概念；在研究撞擊時，我們略去物體的殘餘變形——由此產生完全彈性體的概念；在研究平衡問題時，爲了使理論的探討簡化，略去物體的伸縮性，專講所謂絕對的剛體。

把物性這樣理想化之所以往往必要，是因為現象的本身太複雜了，無法全部都拿來研究。在實際物體上可以造成與理想物體或多或少相近的屬性；這樣說來，理想物體便是實際物體屬性所應趨近的極限狀態了。

在三種物態中，氣體是我們這裏最感興趣的一種物質，關於氣態物質的理論研究，如考慮到它分子之間的內聚力以及分子的體積，那問題就非常複雜了。由於我們對於分子之間內聚力的性質缺乏研究，要找出氣體分子行爲的規律來是很難的。這方面由實驗獲得的數學關係，也很複雜。因此，在研究氣態物質時，我們首先研究分子之間沒有內聚力的那種氣體，並將它的分子當作質點看，假定它沒有體積。這樣的氣體稱爲理想氣體。

理想氣體的研究，有很大的實用價值，這一點是可以確信的，如果我們認識到實際氣體的內聚力及分子體積所起作用的話。

處在不同物態的物體——固態、液態、氣態——分子之間的內聚力及分子間的距離是各不相同的。

在固體裏，原子與原子之間彼此挨得很近，內聚力最大。這裏，原子不作移動運動，僅在它的平均位置附近振擺。

液體的內聚力較小；這裏，分子已有移動運動，但這種運動很受限制，因為分子之間的距離很近。

物體轉變為氣體之後，它的體積，因而也是它分子之間的距離，就大大增加，而內聚力則減小，而且氣態離液態愈遠，這種變化愈強。同一氣體，分子間的內聚力將隨溫度的增加及壓力的下降而減小：這兩個因素使氣體的體積增大，因而分子間的距離增大，後者便使內聚力減小。同時分子本身體積和氣體分子運動所佔的體積比起來，作用就小得多了。氣體運動所佔的體積稱為氣體的體積。

遠離液態的氣態物質，它分子間的內聚力及分子本身的體積，因為很微小，都可以略去不計。這時的氣體，按它的性質說，已經就是我們稱為理想氣體的東西了。這就是我們可以把每一種自然界中實際存在的氣體，略去它微小內聚力以及分子本身體積，而稱之為理想氣體的基礎。根據上面所說的，可知，這樣的假設，在溫度愈高、壓力愈小的時候，愈正確。所以，理想氣體是任何一種實在氣體在它的壓力趨於零($p \rightarrow 0$)，體積趨於無限大($v \rightarrow \infty$)時的極限狀態。

關於能否把某種狀況下的某種氣體當作理想氣體看的問題，決定於計算所需要的精密度。

在熱力學的計算裏，一切熱力學中所遇得見的氣體，除水蒸汽外，都可以認為是理想氣體。水蒸汽在兩種場合裏有它：一種情形下，水

蒸汽是燃料燃燒之後所成的混合氣中的組成部份。那時水蒸汽在很高的溫度及很低的部份壓力下；也可當作理想氣體看。還有大氣裏所包含的水蒸汽可以當作理想氣體看。

另一種常見水蒸汽的場合，是在用蒸汽的動力機裏作為工質，或在加熱器裏充作攜帶熱量的介質。在這兩種情況下，它和液態是很接近的，因此，不能把它當作理想氣體看。

自然界中存在的氣體，凡是分子之間的內聚力及分子本身的體積不能略去的，我們稱它為實際氣體。

1-2 氣體狀況諸參數

我們所研究的數量，可以分為兩大類。一類數量說明物體在給定狀況下的特性。這類的數量稱為物體狀況的函數或參數。另一類是說明過程的數量，說明物體由一種狀況變化到另一種狀況的變化過程。

物體在每一個狀況下，都有它一定的固有的參數值。即使參數中有一個起了變化，也說明物體狀況有了變化。

在這一節裏，我們來介紹某幾個狀況的參數，至於其他的，等以後適當時機再講。

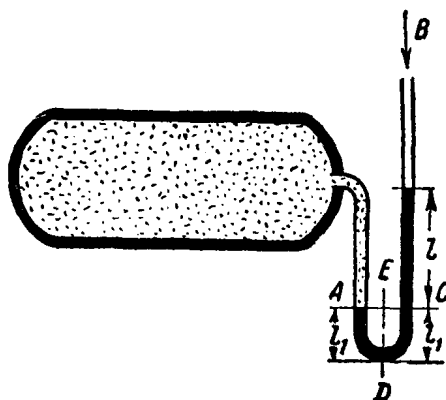
壓力 氣體分子運動學說把氣體的壓力看作是分子撞擊容器內壁的結果。分子是如此之多（因而撞擊也非常之頻繁），以致我們不可能看見它每次撞擊，祇能觀察全部撞擊的總結果；氣體壓力就是這種總結果。

壓力 p 是以作用在單位面積上的力來衡量的。如果力 F 作用在面積 S 上，則

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

假定我們要度量某容器中的氣體壓力(第 1-2 圖)。如果以一根兩頭開口的彎管和容器接上,管裏灌上某種液體,例如汞,在連接之前,在管的兩支裏,液面是等高的,連接之後,就有一邊,譬如左邊,液面下降,而右邊的液面上升。這

就表示容器中氣體的壓力大於大氣壓。



第 1-2 圖

我們來看一看 ED 截面的平衡問題。該截面的左邊有容器中的氣體壓力及高 l_1 的汞柱壓力在作用。該截面的右邊,除高 $(l + l_1)$ 的汞柱壓力之外,還有大氣壓力;大氣柱由地面向空中上伸 300

公里;到了空氣柱的上端界,壓力簡直可以認為是零。因為汞高 l_1 在兩邊是相等的,所以可以不談 ED 截面的平衡,而談 AC 底線的平衡問題。這時,平衡便是由左邊的氣體壓力及右邊的汞高 l 與大氣壓所構成的了。

引用下列各符號: p_1 代表容器中氣體壓力; p_2 —汞柱壓力; B —大氣壓力。就 AC 截面的平衡來說,可以列方程

$$p_1 = p_2 + B \quad (a)$$

又可寫為:

$$p_2 = p_1 - B \quad (b)$$

由方程(b)可見,連接容器的這根度量壓力 p_2 的管子,表示了容器內的壓力 p_1 較大氣壓 B 高多少。這個壓力稱為表壓,因為它表示容器中的壓力比大氣高的那部份。以後我們將記為 p_{use} 。由方程(a)

可見, 要求的容器中氣體壓力 p_1 比 p_{us6} 大了一個大氣壓 B 。爲了區別於 p_{us6} , 所要求的容器中氣體壓力 p_1 稱爲絕對壓力。以後我們記它爲 p_{a6c} 。所以

$$p_{a6c} = p_{us6} + B \quad (1-2)$$

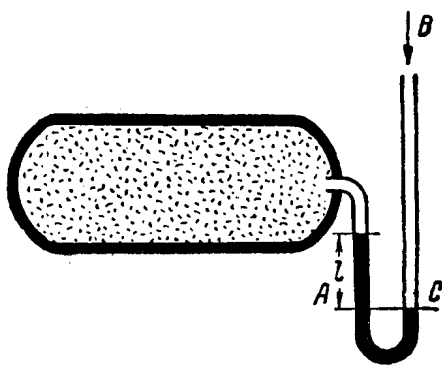
公式(1-2)說明, 要度量容器中高於大氣壓的絕對壓力, 必須在表壓之上再加一個氣壓表壓力; 這個公式以及前面提到的、壓在地面上表現爲氣壓表壓力的空氣柱, 使我們得到這樣一個結論: p_{a6c} 及 B 兩個壓力都是從零算起的。

要作一個能直接量 p_{a6c} 的儀器是相當困難的, 雖然這種儀器已經有了; 因此, 公式(1-2)中的 p_{a6c} 得用兩個儀器量: 一個量 p_{us6} 的, 稱壓力表; 這個表量出來的壓力就稱爲表壓; 另一個儀器量 B 值, 這個稱爲氣壓表。

圖 1-2 表示一種用液體的壓力表; 量很高的壓力時, 用彈簧壓力表, 那種表也跟圖 1-2 上的一樣, 量出來的是表壓。

如果容器中壓力低於大氣壓, 那時拿玻管和容器連接起來, 玻管右支中的汞柱必降低, 而左支中的汞柱升高, 如第 1-3 圖所示。

現在如果來看一下 AC 平面上的平衡條件, 那可以看到, 作用在右邊面積上的是大氣壓 B , 而作用在左邊面積上的是高 l 的汞柱壓力(記爲 h) 以及容器中的絕對壓力。由是可寫下方程



第 1-3 圖

$$p_{a6c} + h = B \quad (c)$$