

高等學校教學用書

普通熱工學

第四冊

С. Я. КОРНИЦКИЙ 等主編

東北工學院熱工教研組譯

龍門聯合書局

東北工學院推薦
高等學校教學用書



普通熱工學

第四冊

С. Я. 闊爾尼茨基 主編
Я. М. 魯濱斯坦
東北工學院熱工教研組譯

龍門聯合書局

本書係根據蘇聯動力出版社 (Государственное энергетическое издательство) 出版的關爾尼茨基 (С. Я. Корницкий) 和魯賓штейн (Я. М. Рубинштейн) 主編「普通熱工學」(Общая теплотехника) 1952 年增訂版譯出的。原書經蘇聯高等教育部審定為高等學校教學參考書。

本書分四冊出版。第一冊內容為工程熱力學及傳熱學。工程熱力學部分論述熱力學的諸定律及其應用,並論述各種熱機與熱裝置的諸循環。傳熱學部分則論述傳導、對流、輻射三種傳熱方式的傳熱理論。

第二、三冊簡稱為「蒸汽循環」,其中包括蒸汽動力裝置的所有材料,即鍋爐燃料、鍋爐組合、蒸汽機汽輪機及蒸汽發電站。

第四冊內容為「氣體循環」,在此部分中論述發動機燃料、內燃機、燃氣輪機及內燃機站等問題。

普 通 熱 工 學

第 四 冊

ОБЩАЯ ТЕПЛОТЕХНИКА

С. Я. Корницкий

主編

Я. М. Рубинштейн

東北工學院熱工教研組 譯

★版權所有★

龍 門 聯 合 書 局 出 版

上海市書刊出版業營業許可證出 029 號

上海南京東路 61 號 101 室

新華書店華東總分店總經售

上海南京西路 1 號

啓 智 印 刷 廠 印 刷

上海自忠路 239 弄 28 號

開本: 787×1092 1/25

印數 0001—8000 冊

印張: 6²⁴/₂₅

1954 年 7 月 第 一 版

字數: 130,000

1954 年 7 月第一次印刷

定價: ¥ 7,000

目 錄

第三部分 氣體循環

第七編 內燃機的燃料

7-1	液體燃料的產生及其分類	1
7-2	燃料的特性	4
7-3	氣體燃料	10

第八編 內 燃 機

第8-1章	內燃機的實際循環和設備	17
8-1	緒言	17
8-2	四衝程和二衝程的過程	20
8-3	氣缸進入新氣	24
8-4	壓縮	28
8-5	燃燒	30
8-6	膨脹和排氣	32
8-7	示功圖。指示功率	35
第8-2章	效率和熱平衡	41
8-8	效率	41

8-9	熱平衡·····	45
第 8-3 章 內燃機計算·····		50
8-10	內燃機基本尺寸的計算·····	50
第 8-4 章 內燃機的混合物形成法、工作混合物的着火、調整和起動·····		57
8-11	外部混合·····	57
8-12	內部混合·····	64
8-13	調整的方法·····	70
8-14	內燃機的起動方法·····	72
第 8-5 章 內燃機的構造·····		74
8-15	內部混合的內燃機·····	74
8-16	外部混合的內燃機·····	78
8-17	活塞式內燃機的分類·····	81

第 九 編 燃氣輪機裝置

9-1	燃氣輪機裝置的特徵及其發展簡史·····	83
9-2	簡單的燃氣輪機裝置的實際循環·····	89
9-3	回熱的和分段燃燒的燃氣輪機裝置·····	95
9-4	燃氣輪機裝置的主要設備和佈置·····	102
9-5	燃氣輪機裝置的工作變化情況及其調整·····	113
9-6	閉式和半閉式過程的燃氣輪機裝置·····	118
9-7	燃氣輪機的工業應用和發展前途·····	124

第 十 編 內燃機熱力站

10-1	熱力站的主要部件·····	131
10-2	液體燃料內燃機的熱力站·····	132
10-3	用天然氣體及鼓風爐煤氣工作的內燃機熱力站·····	139
10-4	煤氣發生器內燃機的熱力站·····	140
10-5	內燃機的維護·····	143
10-6	內燃機裝置的容量、經濟性和安全性的提高 ·····	145
中俄名詞對照表 ·····		150

第七編

內燃機的燃料

7-1. 液體燃料的產生及其分類

內燃機的燃料是直接在此缸內燃燒，同時活塞也在其中運動，因此對燃料的性質便有了一定的要求，並且首先要燃燒後沒有固體殘渣也就是沒有灰。當氣缸壁上有灰出現時，氣缸、活塞、和漲圈的表面便發生極快的磨損以致緊密性減低。因此在內燃機中僅能採用在實際燃燒中不生固體灰的可燃氣體和可燃液體當做燃料。採用固體燃料（粉狀的）當做內燃機的燃料曾作過多次試驗，但至今尚未成功。

石油是得到液體燃料的主要來源。目前生石油，就是沒被提煉的石油，尚不能用作燃料，而需要預先提煉，提煉出來的產物或殘餘物可用作內燃機的燃料。此外從石油中也可以得到潤滑油和某些用作各種生產原料的其他產物。

石油是一種黑色的或褐色的黏性液體。按照化學成分，石油是各種烴（ C_mH_n ）的混合物。在石油的成分中，雖然組成石油的烴的分子結構的樣式很多，但各種石油產物的元素成分幾乎一樣。碳的含量（按重量）在 84—87% 範圍內變動，氫在 11—14% 範圍內變動，氧和氮的總和約佔 1%（在無水產物中）。此外，往往還含有硫黃，通常小於 0.5%，但是在某些類的石油中可達 3% 和以上。在各種燃料中所含有的水分，都規定在 0 到 2% 的範圍內。無水石油產物的發熱量（低發

熱量)也沒有很大差別,一般是從 9 500 到 11 500[大卡]/[公斤]。

石油的預先提煉就是把它分成不同的部分,這些部分是在不同溫度的區域內蒸發出來的。其中每一部分都是不同結構的烴混合物。將石油區分(分餾或蒸餾)的結果可得到:

- 1) 汽油…………… 200°C 以下蒸發出來的
- 2) 火油…………… 200°C 到 300°C 之間蒸發出來的
- 3) 蘇拉油…………… 250°C 到 380°C 之間蒸發出來的

這樣分餾後所剩下來的較重部分稱為重油,或者將它進一步提煉以得到潤滑油,或者直接作為鍋爐設備的爐子、一般爐子和某種形式內燃機的燃料。

除上述所謂直接蒸餾的最簡單的石油提煉方法外,高度提煉的分裂蒸餾法也是很普遍的,此方法可從同樣的原料中得到較直接蒸餾為多的汽油。分裂過程就是在一定的溫度和壓力的條件下,加入特殊的物質(觸媒),使重的烴分子分解成較輕的分子。通常都採用蘇拉油和重油作為分裂用的原料。

目前所採用的開採和提煉石油的大多數方法首先是由祖國的技術工作者和科學家所完成。第一個石油提煉工廠早在 1745 年由普列多諾夫(Ф. Прядунов)所建造。石油的熱分解方法是在 1875 年由烈特尼(А. А. Летние)所發現,並由他建造了第一個分裂蒸餾工廠。到 1880—1890 年門得雷也夫(Д. И. Менделеев)和蘇霍夫(В. Г. Шухов)研究出來一系列提煉石油的生產過程。最後,必須指出的是十月革命以後古布肯(И. М. Губкин)院士、季林斯基(Н. Д. Зелинский)院士和那米特肯(С. С. Наметкин)院士等人的工作。

分餾和分裂出來的產物被進一步提煉、清洗,並區分為蒸發範圍較窄的不同類別。從同一個石油來源所得到的產物,其密度是按蒸發溫

度的減低而對應地減小。

最輕的一類汽油是用在航空內燃機上，稱為航空汽油；較重的為汽車汽油。火油是用作大部分的拖拉機內燃機的燃料，也用在噴氣式內燃機上。

此組燃料(汽油和火油)顯著的特點就是在周圍的空氣溫度下或者少許受熱時有迅速揮發的特性。因此當採用此組燃料時，便可以在內燃機的工作氣缸外製成由燃料蒸氣和空氣所組成的可燃混合物。此種可燃混合物的生成過程稱為汽化。

石油蒸餾後較重的產物和殘餘物就是蘇拉油和重油，並無在低溫下迅速揮發的特性。因此此組燃料和空氣的可燃混合物的形成，並不用預先汽化的方法，而是直接在內燃機氣缸內將燃料注入由壓縮加熱的高溫度空氣中來完成。易揮發燃料的可燃混合物也可以用此法完成。混合物形成的詳細過程見 § 8-11 和 § 8-12。

如前所述，不預先汽化時所用的第二組燃料可分為兩類：第一類為提煉石油時蒸餾出來的燃料即蘇拉油，第二類為提煉的殘餘物即重油。這樣，第一類為蒸餾而來的燃料，而第二類是殘餘物。此種區分決定了燃料很重要的性質，就是決定在內燃機工作過程中燃燒所用的百分之幾秒或千分之幾秒的短時間內燃料在氣缸內燃燒的完全性。不含特別重的、難蒸發的烴屬的蒸餾出的燃料燃燒較為完全，因此是應用在比較高速的內燃機中(汽車、拖拉機等)。蘇拉油和狄賽爾燃料(柴油)就是這種燃料。柴油就是由重火油和輕蘇拉油組成的中間產物。

在比較低速內燃機中(固定的和大型船舶的)採用所謂摩托燃料。在目前有三種用 M3, M4 和 M5 號標記的摩托燃料。M3 號燃料是把石油蒸餾的殘餘物混合成就是含有部分蘇拉油的重油，它是不太黏並能充分流動的液體，其凝固點低於 -5°C 。此類燃料稱為輕摩托燃料。

M4 和 M5 號燃料是由提煉的殘餘物得出的並稱為重摩托燃料。此種燃料在較高的溫度下便凝固，並且某種等級 M5 燃料的凝固點甚至到 $+35^{\circ}\text{C}$ 。因此，在採用重摩托燃料時必須按照其種類預熱到 40°C 至 70°C 以減低其黏性。

7-2. 燃料的特性

可燃混合物形成的不同的方法亦即預先汽化或是將燃料直接注入內燃機氣缸，決定了某種形式內燃機所希望的可燃物應具有的特性。前已指出，用汽化方法形成可燃混合物必須用在不高的溫度下易揮發的燃料。因此揮發性是此類燃料性質的主要指標之一。揮發性是用在一定溫度區域內揮發出來的分量來表示，或者反之，用燃料樣品能蒸發全體積的一定百分數時的溫度來表示。

揮發性是在分餾用的特別儀器內測定的，並且所得出的特性，就是蒸發出來的分量（以%計）與溫度的關係，稱為部分組成。

蒸發量為 10, 50 和 90% 的溫度是分餾的特性點。燃料最輕的部分，就是最初的 10%，稱為起動部分，因為它決定了內燃機起動的難易，那時內燃機還未加熱，燃料的揮發是困難的。次一特性點（50%）表示工作部分的平均溫度，也就是表示燃料主要部分的平均溫度（由 10 到 90%）。最後的特性點（90% 點）即所謂終尾部分，是表示重成分的蒸發溫度的高低。如終尾部分的蒸發溫度高則燃料的性質便不好，因為此成分不能完全揮發便以滴狀被吸入內燃機氣缸，並落於氣缸壁上而洗掉下部的滑油，因而能使活塞在氣缸中的動作受到阻礙。

由此可見，在形成空氣和燃料的混合物的觀點上，燃料的揮發性也表現出燃料的特性。

此外最重要的是要知道燃料在內燃機氣缸內燃燒時所表現的性質。在一定的條件下（對不同的燃料，條件也不同），火焰在可燃混合物中的傳播速度突然增加 $25-30[\text{米}]/[\text{秒}]$ 到 $2000-2500[\text{米}]/[\text{秒}]$

時，將發生所謂呈現出尖銳敲擊的爆燃，此敲擊可引起某些零件的損壞、不完全的燃燒(冒黑煙)和功率的損失。

燃料的爆燃傾向首先由其組成中烴的性質來決定。引起爆燃現象的外部條件中，增壓進氣的壓力(見 § 8-3)和決定內燃機氣缸內被壓縮的工作混合物的壓力與溫度的壓縮比(見 § 1-20)是具有極大意義的。

在 § 1-20 中已指出，內燃機的熱效率是隨壓縮比的增加而增加，因而應力圖提高壓縮比。然而，每種燃料都有發生爆燃的極限壓縮比，所以要靠壓縮比來防止爆燃。因此燃料爆燃性的指數，即所謂辛烷數，是燃料的第二個重要特性。

這個指數的決定是在可變壓縮比的特殊內燃機中進行，並且用具有兩種獨立烴的不同成分混合物的燃料樣品來比較，此兩種烴為異辛烷或正庚烷。異辛烷(iC_8H_{18})的爆燃傾向最小，而標準的正庚烷(nC_7H_{16})的爆燃極劇烈。此兩種烴的混合物的爆燃傾向是介乎兩者之間，視混合物的成分而定。當燃料試驗時，要找出與試樣有相同爆燃性質的混合物。在這種混合物中異辛烷含量的百分數被採為可燃物抵抗爆燃的特性，並稱為燃料的辛烷數。

爲了鑑別比異辛烷更好的燃料的抗爆性，採用了等級比。等級比就是內燃機用該燃料工作時所產生的功率與用異辛烷工作時所產生的功率之比的百分數。

因此爆燃現象除與壓縮比有關外還與許多其他因素有關，如：吸入氣缸內混合物的溫度、壓力和成分、點火方式、轉數等，並且也與內燃機的構造特點有關。辛烷數和等級比的決定是在嚴格的標準條件下進行。

爲了提高燃料的辛烷數可用某種所謂防爆劑的物質加入其中。其中最流行的就是所謂乙醚溶液，它是四乙醚鉛 $[Pb(C_2H_5)_4]$ 的溶液。乙醚溶液是非常有毒的，加入燃料中的量爲 0.2—0.3%，因此在採用加入乙醚的汽油時必須適當的注意。

除了汽化式內燃機燃料的此兩個重要特性(揮發性和抗爆性)以外，還用一系列其他指數來決定燃料的品質：燃料中沒有能引起燃料器具腐蝕的水分、酸和鹼；充分低的凝結溫度，此點在航空內燃機上尤爲重要；儲藏時要有穩定性；沒有能在內燃機內產生垢的溶解膠質等。

此組燃料的基本特性列在表 7-1 中。

表 7-1 航空、汽車和拖拉機燃料的主要特性

(按照 ГОСТ 3784-48, 2084-48 和 1842-46)

	航空汽油 B-100/130	汽車汽油 A-66	拖拉機火油 1
辛烷數不小於.....	100	66	40
等級比不小於.....	130	—	—
部分組成:			
開始蒸發不低於 °C.....	40	—	—
蒸發 10% 時的溫度不高於 °C.....	75	79	230
蒸發 50% 時的溫度不高於 °C.....	105	145	—
蒸發 80% 時的溫度不高於 °C.....	—	—	270
蒸發 90% 時的溫度不高於 °C.....	145	195	—
蒸發 98% 時的溫度不高於 °C.....	—	—	300
蒸發完了時的溫度不高於 °C.....	—	205	—
凝固溫度不高於 °C.....	-60	—	—
溶解的酸、鹼、機械雜質和水.....	無	無	無

不預先汽化的狄賽爾機所採用的燃料的要求，與上面所列舉的有本質上的不同。在這種形式的內燃機中當形成可燃混合物時燃料的揮發是直接在此缸中進行的，在此缸中空氣被壓縮的結果其溫度已達到 500—600°C 的範圍，而在可燃混合物自燃之後溫度將升高到 1500°C 以上。因此繼續注入的燃料的揮發進行極為強烈。然而在快速狄賽爾機中混合物形成和燃燒過程所佔的全部時間是很短的，所以當燃料中具有在溫度 380—400°C 以上才能蒸發的特別重的部分時，將在本質上使混合物的形成過程惡化，因而也惡化了燃料燃燒的完全性。因此在快速狄賽爾機燃料的說明書上必須給出分餾的數據（部分組成）。對於低速狄賽爾機（500 [轉]/[分] 以下的）燃料的揮發性並無重要意

義，然而爲了保證燃燒的完全，也是希望燃料儘可能有窄的部分組成，也就是要在不大的溫度區域內蒸發出來。

對於此組燃料的燃燒完善性和在內燃機氣缸內產生垢的傾向的特性，可用所謂**焦炭數**來表示，此數是表示將燃料放在不通空氣的特製器皿中加熱時所得到的焦炭量（以重量%計）。此種特性是近似的，因爲在氣缸內產生垢的條件，做實驗時是不能在器皿中完全實現的，然而依照此指數可立刻斷定燃料是蒸餾的（焦炭數爲0.1—0.3）或是其中有剩餘產物的雜質（焦炭數大於0.5%）。

狄賽爾機所用的燃料是由重烴組成，與易揮發的氣化的燃料不同。因此這種燃料有較大的密度、相當大的黏性和較高的凝固溫度。某些剩餘產物（重摩托燃料）的黏性可大到如此程度，以致它們本身是不易流動的液體，而在低溫度時甚至能完全失去流動性。但是爲了保證注燃料入氣缸的燃料器具能不間斷地工作，必須黏性不太大。此要求對於高速發動機尤其重要。因此黏性是狄賽爾機用的燃料的基本指數之一。

通常給出的是運動黏性，是以百分斯托克斯來表示（1 斯托克斯 = $1 \text{ [厘米]}^2 / \text{[秒]} = 10^{-1} \text{ [米]}^2 / \text{[秒]}$ ；1 百分斯托克斯 = $10^{-6} \text{ [米]}^2 / \text{[秒]}$ ）或以假定的**英哥萊度**數來表示，英哥萊度數是在 20°C 時燃料試樣由專用的儀器中流出的時間與水從同樣儀器中流出的時間之比。由於黏性是隨溫度的升高而迅速下降，所以決定燃料的黏性要在標準溫度下進行。狄賽爾機燃料的黏性是在 20°C 時決定的，而摩托燃料是在 50°C 時決定的。

由於狄賽爾機內混合物形成的方法和汽化式內燃機內的混合物形成方法根本不同，並且在狄賽爾機氣缸中被壓縮的不是可燃混合物，而祇是空氣，所以在狄賽爾機中不可能產生爆燃的燃燒。但是，當採用某幾類燃料時，尤其在快速狄賽爾機中，也能發現表面上和爆燃相類似的現象，就是有時可引起某些零件的損壞的**硬性**工作。通常用這種燃料來發動內燃機也是很困難的。然而，這種現象一系列因素的關係恰

和以前所講的相反。例如，提高壓縮比、增加吸入氣缸的空氣溫度和壓力可減低工作的硬性，而這些因素反而能增加爆燃。

發動的困難性以及工作的硬性均由燃料自燃不良性來決定，這種自燃的不良性是用燃料的**十六烷數**來表示。此點將在 § 8-5 中進一步的詳細敘述。

目前所採用的決定燃料自燃性的方法和以前所敘述的決定燃料爆燃性的方法相似。試驗是在可變壓縮比的特製內燃機中進行，進行試驗時的溫度和轉數等是在嚴格的標準條件之下。

試驗時是選擇自燃性和被試驗燃料一樣的兩種單獨的混合物。採取易自燃的**十六烷**($C_{16}H_{34}$)和極難自燃的 α -**甲基萘**($C_{11}H_{10}$)作為標準混合物的成分。採用當量混合物中的十六烷的百分含量，即所謂燃料的**十六烷數**作為燃料的自燃性指數。

某些藥劑可被採用作為加入燃料內以改善自燃性之用。

因為在壓縮着火內燃機中，自燃性並不限制壓縮比的提高的可能性，也就是內燃機經濟性的提高不受限制，所以此指數不像汽化用燃料的辛烷數那樣有意義。

為了保證內燃機工作的安全性和持久性，對於此組燃料，也像對前一組燃料一樣，須提出一些附加的要求，就是：在燃料中沒有酸和鹼，灰與機械雜質和水的含量要最小，如果內燃機須在低溫的周圍介質內工作時，還要求燃料有足夠低的凝結溫度。此組燃料的主要特性列於表 7-2 中^①。

目前，全世界內燃機燃料的消費量的 97% 是靠提煉石油所得到的燃料來滿足。然而由於大量液體燃料的需要和其資源的限制，石油燃料代用品的生產也就得到發展。這種代用品主要是提煉煤炭、褐煤和可燃的油頁岩所得到的。由非石油來源的燃料中，**苯**(C_6H_6)具有很重

① 詳見羅希考夫 (Б. Лосиков) 和路克什維奇 (И. Лукашенич) 著：石油商品學，第二版，М.-Л.，國家燃料工業出版社 1950。

表 7-2 狄賽爾機燃料和摩托燃料的主要特點
(按照 ГОСТ 4749-49, 1666-42 和 1667-42)

	狄賽爾機燃料		蘇拉油	摩托燃料		
	夏季的	冬季的		M-3	M-4	M-5
十六烷數不小於·····	45	40	—	—	—	—
部分組成:						
蒸餾 10% 時的溫度不低於 °C·····	—	200	—	—	—	—
50% 的溫度不高於 °C	290	275	—	—	—	—
90% 的溫度不高於 °C	350	335	—	—	—	—
20°C 時的運動黏性:						
百分斯托克斯 ·····	3.5—8.0	3.5—6.0	—	—	—	—
°D (英哥萊度) ·····	1.25—1.70	1.25—1.45	—	—	—	—
50°C 時的運動黏性:						
百分斯托克斯 ·····	—	—	2.8—9.0	36	57	68
°D (英哥萊度) ·····	—	—	1.2—1.75	5.0	7.5	9.0
焦炭數不大於 % ·····	0.05	0.05	—	3.0	3.5	4.0
凝結溫度不高於 °C·····	-10	-45	-20	-5	-5	+5(+36)
灰不大於 % ·····	0.02	0.02	0.025	0.04	0.08	0.08
水不大於 % ·····	0	0	極微	1.0	2.0	2.0
機械雜質不大於 % ·····	0	0	0	0.1	0.1	0.1
溶解的酸和鹼 ·····	0	0	0	0	0	0

要意義，它是由煤焦化時分餾出的氣體而得來的。苯的突出特點是有極高的防爆性，因此主要是把它加入由石油提煉的汽油中，以便提高汽油的辛烷數。

除苯之外，還採用一些焦煤的產物，這種焦煤是在把煤和油頁岩半焦化時所得來的。

最後，還研究出由固體的炭(煤)和氣體的氫合成製造液體烴的方法。這種液體烴的製造，是在高壓和高溫的條件下，並且須在複雜和貴重的器具中用觸媒來進行。然而由於內燃機燃料需要量很大，因而此種製造燃料的方法得到廣範的發展。

7-3. 氣體燃料

作為內燃機燃料的氣體可燃物可分為兩大類：1) 自然(天然)氣體，它是由地下的氣體礦床中得來或是隨着開採石油而得到的氣體(油井氣體)，2) 由各種生產中的排出物得到的煤氣(鼓風爐煤氣、煉焦煤氣、分裂煤氣)或是在爐中和煤氣發生器中專門生產出來的煤氣(照明用煤氣或城市用煤氣和發生爐煤氣)。

第一類氣體是具有高發熱量的所謂濃氣體。這種氣體的可燃部分是由烴組成，並且在自然氣體中甲烷(CH_4)是主要成分，其含量達85—90%。油井氣體的甲烷含量在40到60%之間；其餘的可燃部分是由烷族中較重的烴(乙烷— C_2H_6 ，丙烷— C_3H_8 等)所組成。自然氣體和油井氣體中的不可燃部分一般是不多的，它是由氮(N_2)、二氧化碳(CO_2)和某些其他氣體的混合物所組成的。這些氣體的平均成分及其發熱量列在表7-3中。

油井氣體在用做燃料之前要進行特殊的加工，並且在加工中可分出在常溫下便凝結的較重的烴。此種液體的產物稱為氣體汽油，其特

表 7-3 可燃氣體的特性

	按容 積 的 分 組 成						低 發 熱 量 Q_d^0 [大卡]/標準[米] ³
	CO	H ₂	CH ₄	C _n H _m	CO ₂	O ₂	N ₂
自然氣體和由石油提煉 的氣體.....	0—1.5	0—30	10—35	1—20	0—10	0—7	0.1—10
煉焦煤氣.....	5—10	42—55	10—25	1.5—3	2—4	0.1—1	5—10
照明用煤氣.....	4—12	42—53	27—30	3—6	0.5—3	0.1—1	1—8
發生爐煤氣:							
由無煙煤得來的.....	25—28	12—16	1—2.5	—	3—6	0.5—0.8	50—58
由木柴得來的.....	13—18	9—15	2.5—3.5	1—0.5	10—13	0.5—0.8	53—58
鼓風爐煤氣.....	26—33	1—3	0.2—0.5	—	7—12	—	57—60