

氣體熱力性質表

全蘇熱工研究所著

交通大學熱工教研室譯

龍門聯合書局出版

氣體熱力性質表

蘇聯電力工業及電廠部
榮獲勞動紅旗勳章以Ф.Э.捷爾仁斯基命名的
全蘇熱工研究所著

交通大學熱工教研室譯

龍門聯合書局出版

本書內容包括各種氣體，按理想狀態來計算的熱力性質表。表中的溫度範圍是從 -50° 到 1500°C 。

在製作這些表的時候曾採用了最新的氣體比熱數據。

書中且附有四張熱力圖，以供計算下列四種典型燃料的燃燒產物之用：重油、鼓風爐焦炭煤氣、薩拉多夫煤氣、石炭在地下氣化時所產生的煤氣。

每一張熱力圖中都含有空氣的各種熱力性質。

本書可供設計及科學研究機關、各電廠及製造廠的工程技術人員和高等學校學生之用。

譯 序

在熱力學、熱工學等課程的教學過程中，我們感覺到工質方面的狀態參數，以及有關熱力變數的計算，應用圖表不僅符合實際要求和準確度，而且在解決問題的步驟上，提供了一個確切而便捷的方法。大家都承認，重要圖表是工程師和技術人員的有力工具；即對學習這方面理論基礎的同學來講，適當的圖和表，也可以幫助他們了解學理在實際上的應用和證明，科學上解析問題的手段，以及現代實驗研究應用的方法。在提高他們實驗和研究的技術一點上，這無疑是很重要的。

關於水蒸汽方面的熱力圖表，國內已有出版。但各種氣體的熱力性質圖表迄今還很少見，既新又較準確且切於實用的更是沒有。由於這個原因，以及上節所說圖表的重要性，我們本學習的原意，翻譯了這本由全蘇熱工研究所所著的氣體熱力性質表。這書誠如原文所述：可供設計及科學研究機關、各電廠及製造廠的工程技術人員和高等學校學生之用。在書中的第一、二兩單元裏，並詳細闡釋製作圖表所根據的熱力學基礎以及用法示例等，對數學來說，也是很好的綜合性資料。

本書係由陳丹之、蔡祖恢、陸聲廷、周淑瑛四同志分段翻譯，並經陳丹之同志整理，由瞿鈺同志校閱。我們能力薄弱，錯誤難免，敬懇讀者不吝指正，來函請寄交通大學熱工教研室，我們謹於此附致感激之忱。

交通大學熱工教研室

一九五四年五月十日

目 錄

譯 序

緒 論	1
I. 氣體的熱力性質表	3
1. 製表所根據的熱力學基礎	3
2. 表的說明	4
3. 表的應用範圍	5
4. 用表示例	7
II. 空氣與給定燃料的燃燒產物的熱力圖	9
5. 製圖方法	9
6. 製圖示例	12
7. 用圖示例	14
參考文獻	17
I. 氣體的各種熱力數值表	19
第1表 空氣	19
第2表 氧氣	19
第3表 二氧化碳	20
第4表 水蒸氣	20
第5表 大氣中的氮	21
第6表 一氧化碳	21
II. 當 $\alpha = 1$ 時, 各種燃料燃燒產物的熱力數值及組成百分比	22
屬下列各種燃燒產物: 鼓風爐煤氣、地下煤氣、重油、自然煤氣(薩拉多夫當地出產)、濕空氣	22
III. 當 $\alpha = 1$ 時, 各種燃料的燃燒產物的比熱	23
第1表 鼓風爐煤氣的燃燒產物	23
第2表 重油的燃燒產物	24
第3表 地下煤氣的燃燒產物	25
第4表 自然(薩拉多夫)煤氣的燃燒產物	26
IV. 各種氣體熱力性質表	27
第1表及第2表 空氣	27
第3表及第4表 氮氣	56
第5表及第6表 大氣中的氮	86
第7表及第8表 氧氣	116
第9表及第10表 二氧化碳	146
第11表及第12表 水蒸汽	176
第13表及第14表 一氧化碳	206
第15表及第16表 氫氣	236
V. 熱力圖(書末附頁)	
第1圖 鼓風爐焦炭煤氣燃燒產物的熱力圖	
第2圖 重油的燃燒產物的熱力圖	
第3圖 石灰地下氣化時所產生煤氣的燃燒產物的熱力圖	
第4圖 薩拉多夫出產的自然煤氣的燃燒產物的熱力圖	

結 論

由於燃氣透平技術的發展，對於計算上可靠的各種氣體熱力性質圖表的需要也跟着增加了。

現有的有關空氣及燃燒產物的各種熱力圖，都存在着缺點。如一九三三年完成的一套供燃燒產物用的 IS 圖[文獻 1]只包括有限的混合氣體組，並且這套 IS 圖是依據爆炸法而測得的不準確的比熱數據來作成的。

斯托陀拉在他那時期所建議的熱力圖[文獻 2]，雖然包括了任意成分的混合氣體的各種熱力性質，但是需要對取決於混合氣體的成分的諸有關主要參數進行着複雜的計算。

而且當時採用比熱和溫度成直線關係的辦法[文獻 1 和 2]與實際的比熱數值也不相符合。

現時最通用的空氣和燃燒產物的 IS 圖是在一九三八年製成的[文獻 3]，這張 IS 圖在大多數燃氣透平的教本和手冊裏都列為附頁，雖然它已根據修正過的比熱數值來製作，但缺點就在於圖中的許多絕熱線，是用與某些規定的曲線成等距離的曲線來表示，而熱降值是按非直線的比例尺來計算的——這種比例尺係由代表該種成分的混合氣體的特性參數來規定。

由於上面所舉的理由，使得用這張 IS 圖感到不方便，即用它來作計算也有困難並且不夠準確。再由於比例尺的混淆，燃燒產物的過程不能很明顯地被表示出來，這是因為圖中對應於熱降的線段並不能直接反映出真實的熱降值。同時由於圖中含有稠密的曲線網，所以作圖也非常複雜。

而且還必須指出，自從這張圖發表以後，氣體的比熱數值已經作過修正。

在一九四九年曾有以美制為單位，出版了氣態燃燒產物的熱力性質表[文獻 4]。但表中僅包括有關液體碳氫化合物的燃燒產物的各種熱力性質，如果用來準確地計算其他燃料的燃燒產物，則這些表顯然是不能應用的。

本書的主要內容是各種氣體的熱力性質表，可供對任何成分的燃燒產物使用，並且在目前所應用的有關重要的狀態參數範圍內得以保證對熱力計算有高度的準確性。

書中除了表以外，還附有四種典型燃料（重油、鼓風爐焦炭煤氣、石炭在地下氣化時所發生的地下煤氣，以及薩拉多夫的自然煤氣）的燃燒產物的新熱力圖，並對它們

的作法也有說明。這些熱力圖的特點是作法非常簡單、使用起來很方便且具有高度的準確性。

在製作這些熱力性質的圖表時，曾採用了最新的比熱數值，這些數值是按光譜數據，並且考慮到最新的基本物理常數推算出來的，對水蒸汽及二氧化碳來說更考慮到它們分子的離心變形。

書中所列的熱力性質圖表是在全蘇熱工研究所的物理-技術部由技術科學碩士 G. Л. 里夫金領導之下完成的。

I. 氣體的熱力性質表

1. 製表所根據的熱力學基礎

在製作本書中的這些氣體表時，我們假定，在表中所列的數據範圍內，這些氣體都遵循理想氣體的狀態方程式

$$Pv = RT. \quad (1)$$

一般說來，如果氣體的壓力愈高、溫度愈低，則這個方程式所示的情態也就愈不準確。實際上常常有這樣的情況，即在高溫度範圍內，同時壓力也很高，或者在低壓力範圍內，同時溫度也很低。換句話說，實際上我們常常要碰到這種情況，這時候氣體的狀態參數，如按照理想氣體的特性方程式來處理是足夠準確的。

由於遵循方程式(1)的理想氣體的熱焓及內能僅與溫度有關，所以書中的這些表也可以只憑藉氣體的一個參數而編製。

現在我們將熱力學的基本方程式寫成如下形式：

$$Tds = di - v dP, \quad (2)$$

或
$$Tds = c_p dT - v dP. \quad (2')$$

對於等熵過程來說

$$0 = c_p dT - v dP. \quad (3)$$

把特性方程式(1)中的 v 值代入上式，再將各變數分離之後，得：

$$\frac{dP}{P} = \frac{c_p}{R} \cdot \frac{dT}{T} \quad (3')$$

再經積分後得：

$$\ln \frac{P}{P_0} = \frac{1}{R} \int_{T_0}^T \frac{c_p}{T} dT. \quad (4)$$

令 s° 表示 $\int_{T_0}^T \frac{c_p dT}{T}$ ，則上式可改寫成：

$$\ln \frac{P}{P_0} = \frac{s^\circ}{R}. \quad (5)$$

如任取一溫度 (T_0) 作為基礎溫度，那末壓力比 $\frac{P}{P_0} = \pi_0$ 只決定於溫度的函數而與熵的數值無關。這壓力比 π_0 以後就稱為相對壓力。

同樣相應的比容間之比也成為溫度的函數，並可由下式來確定

$$\ln \frac{v}{v_0} = -\frac{1}{R} \int_{T_0}^T \frac{c_v \cdot dT}{T} \quad (6)$$

或

$$\theta_0 = \frac{v}{v_0} = \frac{T}{T_0} \cdot \frac{P_0}{P} \quad (7)$$

方程式(2)可以寫成:

$$ds = c_P \frac{dT}{T} - R \frac{dP}{P} \quad (8)$$

熵的數值可用下式來計算

$$s = \int_{T_0}^T c_P \frac{dT}{T} - R \ln P = s^\circ - R \ln P; \quad (9)$$

此處係由任選基礎溫度為 T_0 , 壓力為 1 氣壓時的熵作為零值算起,

氣體任意兩狀態間的熵的變化等於

$$s_2 - s_1 = s_2^\circ - s_1^\circ + R \ln \frac{P_2}{P_1} \quad (10)$$

分析方程式(5),(9)及(10)可以得出結論,氣體在等熵過程中從溫度 T_1 轉移到溫度 T_2 時的壓力 P_1 與 P_2 之比就等於溫度 T_1 及 T_2 時的相對壓力 π_{01} 及 π_{02} 之比:

$$\left(\frac{P_1}{P_2} \right)_{s=\text{常數}} = \frac{\pi_{01}}{\pi_{02}} \quad (11)$$

同樣

$$\left(\frac{v_1}{v_2} \right)_{s=\text{常數}} = \frac{\theta_{01}}{\theta_{02}} \quad (12)$$

2. 表的說明

按照上面所引的這些關係,製作了本書中的熱力性質表。

為了可以對任意成分的燃燒產物進行計算,最好給予混合氣體的每一成分以詳細的熱力性質。此時混合氣體的各項數值就可憑各成分的數據按簡單的混合律來計算。因此實用上決定採用 N_2 , O_2 , CO_2 及 H_2O 等四種表格。

對於空氣則單獨作出熱力性質表。

在作這些氣體的熱力性質表時,曾採用了最新的比熱數值作為計算的基礎,這些比熱數值是按光譜數據,並且考慮到新的基本常數而推算出來的。對於水蒸汽及二氧化碳來說——並考慮到它們分子轉動時離心變形。

我們取國際電學大卡作為熱的單位:

$$1 \text{ 國際電學大卡} = \frac{1}{860} \text{ 國際仟瓦小時.}$$

作表時所取的間隔是 $1^\circ C$, 表中所包括的溫度範圍是從 $-50^\circ C$ 一直到 $1500^\circ C$ 。

表中的第一縱行列百度溫標(t)的溫度數值,第二縱行列凱爾文溫標(T)的絕對溫度數值。

其次,表中尚列熱焓(i)[大卡/公斤]、內能(u)[大卡/公斤]以及無因次的相對壓力(π_0)、相對比容(θ_0)和

$$w_c = \int_{T_c}^T \frac{c_p dT}{T} \text{ [大卡/公斤 } ^\circ\text{C}]$$

等數值。

在計算時,常常取用其相應的模爾大卡值[大卡/模爾]較為方便。

因此在表中的最後三項列有以模爾氣體為單位的熱焓(I),內能(U)及(S°)等數值。

基礎溫度則採取絕對零度。又採取溫度在 298.16°K 時的熱焓值及 $s^\circ = \int_{T_0}^T \frac{c_p dT}{T}$ 值作為標準值。

在後頁提出的這些表中包括純氮氣、大氣中的氮、氧氣、水蒸汽、二氧化碳、一氧化碳、氫氣以及空氣等熱力性質表。

對於上面所列舉的每一種氣體,還列有補充性的表格,包括 C_p 大卡/模爾、 c_p 大卡/公斤、 C_v 大卡/模爾、 c_v 大卡/公斤及 $k = \frac{C_p}{C_v}$ 等數值。

在製作空氣及大氣氮等熱力性質表時,曾採取下列的容積百分比:

(a) 空 氣	(6) 大 氣 氮
氮.....0.7803	氮.....0.9876
氧.....0.2099	氫.....0.0119
氫.....0.0094	二氧化碳.....0.0004
氫.....0.0001	氫.....0.0001
二氧化碳.....0.0003	

3. 表的應用範圍

實際氣體和混合氣體,嚴格地說,是不遵守理想氣體的狀態方程式的,惟製表時曾假定它們遵守該方程式。因此在各種不同參數範圍內,把所列表格作出準確度的估計,並且指出它們的應用範圍,這對實用上來說是極其重要的。

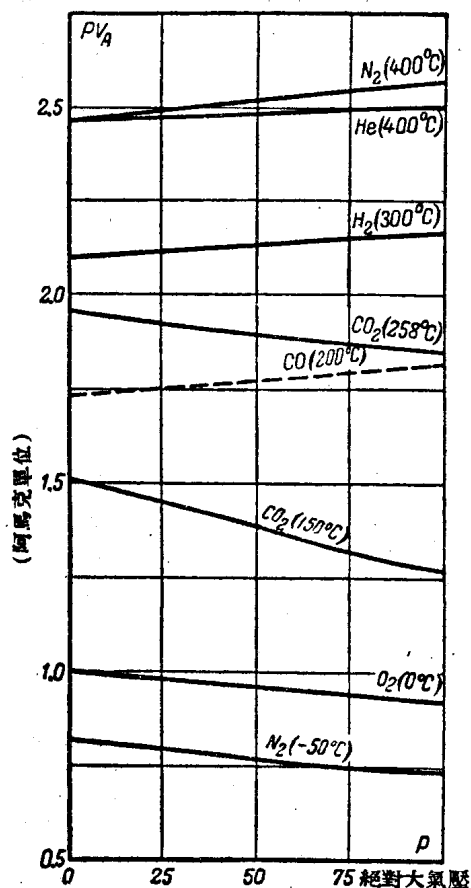
爲了要作這樣的估計,我們合理地選取一實際氣體的狀態方程式,這個方程式在我們探求的範圍內,應當能很好地符合這些氣體的情態。

從純粹氣體的有關壓縮性的許多實驗數據分析中,我們推得在中壓(50 公斤/平方公分左右)而溫度遠離臨界值時, $P - P_v$ 座標中的等溫線,在很廣的溫度階段內實際上可以作為直線來(第 1 圖)處理。

這個區域內的氣體狀態方程式可以寫成:

$$Pv = RT + BP, \quad (13)$$

式中 B ——是溫度的函數(稱為第二變係數)。



第1圖 幾種氣體的 $Pv-P$ 圖
 Pv 以阿馬克為單位; $Pv = \frac{(Pv)_{p,t}}{(P_0v_0)_{1,0}}$

知道了某種氣體的第二變係數 B 與溫度之間的關係後,就可以求出該種氣體的壓力與熱力數值之間的關係。

不難證明,壓力對於氣體熱焓的影響係直線關係,亦即

$$i - i_0 = B_1 P, \quad (14)$$

式中 i ——實際氣體的熱焓;

i_0 ——在理想氣體狀態下氣體的熱焓
 (當 $P \rightarrow 0$);

B_1 ——溫度的函數。

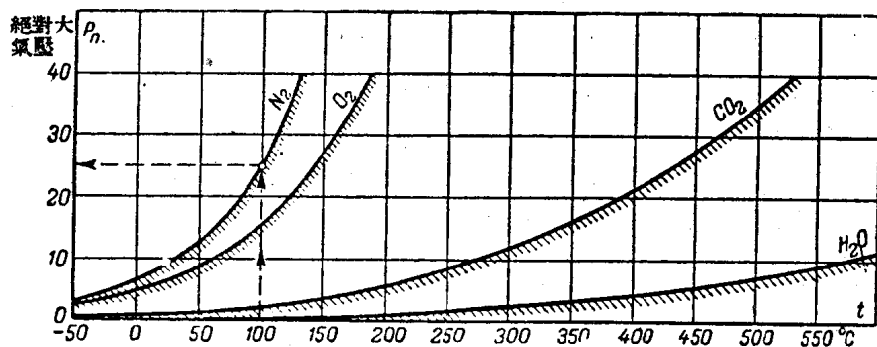
因此,確定了壓力對熱焓的影響之後,就可以估計出那壓力和溫度的範圍,在這範圍內,這種影響將表現在一定程度上。

我們規定製表時的容許誤差在 0.5% 內 ($i - i_0 = 0.005 i_0$), 亦即這個數值的大小和蒸汽表的容許誤差一樣,因此可以按照純粹氣體的方程式(14)求出極限壓力,在這個壓力之下,表的誤差將不會超過上列數值。

第2圖中的縱座標為氣體的極限壓力,橫座標為溫度,曲線即表示氮氣、氧氣、二氧化碳、水蒸汽等四種氣體的極限壓力與溫度之間的關係。

同時在圖上還示有用圖解方法來計算的應用例子。

對於混合氣體,我們可以首先近似地應用(13)的狀態方程式,同時再依據各成分



第2圖 極限壓力與溫度之間的關係

的比容按混合律來計算混合氣體的比容。

此時壓力對於熱焓的影響也將成為直線關係：

$$(i - i_0)_{\text{混合氣}} = B_{1\text{混合氣}} \cdot P, \quad (15)$$

其中 $B_{1\text{混合氣}}$ 是依各成分的 B_1 值按混合律來計算的。

用同樣的方法也可以估定那混合氣體的極限壓力，而使此時表的誤差將不會超過容許值 0.5%。

如果根據上述的方式來進行計算，那末書中所列的這些熱力數據表，對於燃氣透平工程中所需實際用到的壓力到 25—30 公斤/平方公分的範圍以及溫度來說，都是相當準確的。

必須指出，如果我們按照現有可靠的並以實驗為基礎的水蒸汽表及二氧化碳表中所求得的熱降值來和按照現在這裏的熱力性質表所求得的熱降值相比，那末可以看出，這兩者之間是能夠很好地符合的。倘壓力不超過第 2 圖所示的極限數值，則無論在何種情況之下，實際的絕熱熱降和按現在這些表格所求得的熱降，兩者間的誤差不會超過 0.5%，這就很好的證實了我們在估計表的應用範圍這事上所採用方法的可靠性。對於三原子氣體來說，它們離開理想氣體方程式所示情態很遠，但是對於它們的準確度也已經作了估計。

4. 用表示例

例 1. 在氣壓機中空氣的壓縮。

由壓氣機中吸進來的空氣，壓力 $p_1 = 1$ 絕對大氣壓，溫度 $t_1 = 20^\circ\text{C}$ ，壓縮到 4 絕對大氣壓，試求其絕熱壓縮的理論功以及當壓氣機的相對內效率 $\eta_{oi} = 0.85$ 時的實際功，並求出壓縮終了時氣體的溫度和焓的變化。

從第 29 頁第 2 表中，當 $t_1 = 20^\circ\text{C}$ 時，查得

$$\pi_{01} = 1.2788; \quad i_1 = 70.05 \text{ 大卡/公斤}; \quad s_1^* = 1.59525 \text{ 大卡/公斤}^\circ\text{C}.$$

指標 1 表示吸進來空氣的數據。為了確定絕對壓縮後的空氣狀態，先根據壓縮終了時的氣體壓力求出壓力比：

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{4}{1} = 4; \quad \pi_{02s} = 4 \times 1.2788 = 5.1152.$$

從第 31 頁第 2 表中，以 $\pi_{02s} = 5.1152$ 為目標，用比例增減法求得：

$$i_{2s} = 104.21 \text{ 大卡/公斤}; \quad s_{2s}^* = 1.69028 \text{ 大卡/公斤}^\circ\text{C}; \quad t_{2s} = 161.71^\circ\text{C}.$$

理論壓縮功

$$i_{2s} - i_1 = \Delta i_{\text{絕熱}} = 104.21 - 70.05 = 34.16 \text{ 大卡/公斤}.$$

當 $\eta_{oi} = 0.85$ 時，實際壓縮功

$$i_2 - i_1 = \Delta i_{\text{實際}} = \frac{34.16}{0.85} = 40.19 \text{ 大卡/公斤}.$$

現在來求在實際壓縮過程終了時的空氣狀態參數。

在壓縮終點的空氣熱焓

$$i_2 = i_1 + 40.19 = 70.05 + 40.19 = 110.24 \text{ 大卡/公斤}.$$

從第 32 頁第 2 表中，查得：

$$t_2 = 186.44^\circ\text{C} (i_2 = 110.24 \text{ 大卡/公斤}),$$

$$s^* = 1.70376 \text{ 大卡/公斤}^\circ\text{C}.$$

熵的變化可由下列關係來計算

$$s_2 - s_1 = R \ln \frac{p_2}{p_1} + s_2^c - s_1^c,$$

或

$$s_2 - s_1 = s_2^c - s_{2s}^c;$$

$$s_2 - s_1 = 1.70376 - 1.69028 = 0.01348 \text{ 大卡/公斤 } ^\circ\text{C}.$$

例 2. 已知燃料燃燒後的氣體燃燒產物的容積百分比為：

$$r(\text{CO}_2) = 7.5\%; \quad r(\text{O}_2) = 10.0\%; \quad r(\text{N}_2) = 76.5\%; \quad r(\text{H}_2\text{O}) = 6.0\%,$$

和當做功時，其壓力由 $p_1 = 5$ 絕對大氣壓膨脹到 $p_2 = 1$ 絕對大氣壓；其相當溫度由 $t_1 = 500^\circ\text{C}$ 至 $t_2 = 290^\circ\text{C}$ 。

試求膨脹功和膨脹過程的內效率。

根據在膨脹前的初溫 $t_1 = 500^\circ\text{C}$ 從表中查得該混合氣體各成分的熱焓為：

$$I_1(\text{CO}_2) = 7358.5 \text{ 大卡/模爾}; \quad \pi_{01}(\text{CO}_2) = 22.467;$$

$$I_1(\text{H}_2\text{O}) = 6415.3 \text{ 大卡/模爾}; \quad \pi_{01}(\text{H}_2\text{O}) = 41.249;$$

$$I_1(\text{O}_2) = 5634.6 \text{ 大卡/模爾}; \quad \pi_{01}(\text{O}_2) = 181.20;$$

$$I_1(\text{N}_2) = 5461.7 \text{ 大卡/模爾}; \quad \pi_{01}(\text{N}_2) = 30.387.$$

$$I_{1\text{混合}} = 7358.5 \times 0.075 + 6415.3 \times 0.06 + 5634.6 \times 0.10 + 5461.7 \times 0.765$$

$$= 551.89 + 384.92 + 563.46 + 4178.20 = 5678.3 \text{ 大卡/模爾}.$$

現在再從表中求出絕熱膨脹終了時各組成氣體的熱焓：

$$\pi_{02s}(\text{CO}_2) = 22.467 : 5 = 4.4934; \quad I_{2s}(\text{CO}_2) = 5191 \text{ 大卡/模爾}; \quad t_{2s} = 315.42^\circ\text{C};$$

$$\pi_{02s}(\text{H}_2\text{O}) = 41.249 : 5 = 8.2498; \quad I_{2s}(\text{H}_2\text{O}) = 4337.7 \text{ 大卡/模爾}; \quad t_{2s} = 264.84^\circ\text{C};$$

$$\pi_{02s}(\text{O}_2) = 181.20 : 5 = 36.240; \quad I_{2s}(\text{O}_2) = 3605.3 \text{ 大卡/模爾}; \quad t_{2s} = 238.2^\circ\text{C};$$

$$\pi_{02s}(\text{N}_2) = 30.387 : 5 = 6.0774; \quad I_{2s}(\text{N}_2) = 3459.8 \text{ 大卡/模爾}; \quad t_{2s} = 223.9^\circ\text{C}.$$

$$I_{2s\text{混合}} = 5191.5 \times 0.075 + 4337.7 \times 0.06 + 3605.3 \times 0.10 + 3459.8 \times 0.765$$

$$= 389.36 + 260.26 + 360.53 + 2646.74 = 3656.9 \text{ 大卡/模爾}.$$

理論膨脹功

$$I_{1\text{混合}} - I_{2\text{混合}} = 5678.3 - 3656.9 = 2021.4 \text{ 大卡/模爾}.$$

知道了在膨脹終了時混合燃氣的溫度之後，就可求出實際膨脹功。從第 4, 8, 10 和 12 表中求得溫度在 t_2 時(實際膨脹過程終點)各組成氣體的熱焓，再各以相應的模爾比數乘之，得

$$I_2(\text{CO}_2) = 4908.0 \times 0.075 = 368.10 \text{ 大卡/模爾};$$

$$I_2(\text{H}_2\text{O}) = 4552.6 \times 0.06 = 273.16 \text{ 大卡/模爾};$$

$$I_2(\text{O}_2) = 3994.6 \times 0.10 = 399.46 \text{ 大卡/模爾};$$

$$I_2(\text{N}_2) = 3929.2 \times 0.765 = 3005.80 \text{ 大卡/模爾}.$$

按混合律

$$I_{2\text{混合}} = 4046.52 \text{ 大卡/模爾}.$$

實際功等於

$$I_{1\text{混合}} - I_{2\text{混合}} = 5678.3 - 4046.5 = 1631.8 \text{ 大卡/模爾}.$$

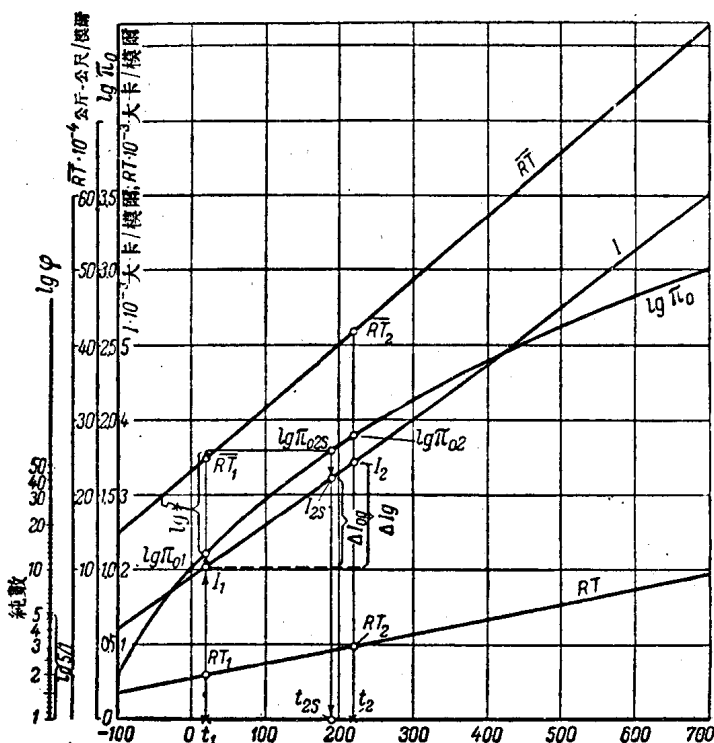
膨脹過程的相對內效率

$$\eta_{01} = \frac{(I_{1\text{混合}} - I_{2\text{混合}})_{\text{實際}}}{(I_{1\text{混合}} - I_{2\text{混合}})_{\text{理論}}} = \frac{1631.8}{2021.4} = 0.808.$$

II. 空氣與給定燃料的燃燒產物的熱力圖

5. 製圖方法

在實際計算中，用圖往往比用表來得方便。因此最好把現在這些熱力性質表補充以應用起來相當準確並且很方便的熱力圖。如果我們仍利用作表時所規定的那幾種基本關係，那末這些圖是同樣可以製出的。



第3圖 空氣熱力圖的應用示例

在製空氣的熱力圖(第3圖)時我們以橫座標來表示溫度(譬如百度溫標溫度),縱座標表示熱焓(I)和相對壓力的對數值($\lg \pi_0$);在圖中我們繪製模爾氣體的 I , $\lg \pi_0$, RT 大卡/模爾, $\overline{RT}$ 公斤公尺/模爾與溫度之間的關係曲線。利用這張熱力圖就很容易像利用空氣的 IS 圖那樣地來進行計算,而且它肯定地要比 IS 圖簡單得多:因為在 IS 圖上佔有大量的曲線而在這張熱力圖內總共只有兩條主要曲線與兩條補助直線。

要確定絕熱熱降僅需一條補助標尺就行，按照這條標尺就可計算絕熱過程中壓力變化比值的對數($\lg \varphi$)。

必須指出,相對壓力的對數($\lg \pi_0$)曲線是可以用來計算實際過程中熵的變化的。事實上,方程式(5)對等熵過程來說是正確的:

$$\ln \pi_0 = \frac{S^\circ}{R}, \quad \text{或} \quad \lg \pi_0 = \frac{S^\circ}{R} \cdot \lg e,$$

式中 e ——自然對數的底:

$$\lg e = 0.43429;$$

R ——模爾氣體常數,它等於 1.98581 大卡/模爾 $^\circ\text{C}$ 。

因此

$$S^\circ = \frac{R}{\lg e} \cdot \lg \pi_0 = \frac{1.98581}{0.43429} \cdot \lg \pi_0 = 4.5725 \cdot \lg \pi_0. \quad (16)$$

此外,對於等熵過程來說,

$$0 = R \ln \frac{P_2}{P_1} + S_2^\circ - S_1^\circ, \quad (17)$$

式中 S_2° ——進行等熵過程至終點溫度時,氣體熵 S° 的數值;

S_1° ——該等熵過程中從起點溫度算的氣體熵 S° 的數值。

在相同壓力 P_1, P_2 及相同初溫之下,對實際的絕熱變化過程來說

$$S_2 - S_1 = R \ln \frac{P_2}{P_1} + S_2^\circ - S_1^\circ, \quad (18)$$

式中 S_2° ——在實際過程中終點溫度時氣體 S° 的數值。

從(18)式中減(17)式,使得:

$$S_2 - S_1 = S_2^\circ - S_1^\circ, \quad (19)$$

這就是說,實際過程中熵的變化即等於在實際過程的與在等熵過程的氣體終點溫度下的兩 S° 值之差(同一壓力比之下)。

以方程式(16)中的 S_0 值代入後一等式,得:

$$S_2 - S_1 = 4.5725 (\lg \pi_{02} - \lg \pi_{01}), \quad (20)$$

亦即熵的變化可經由相對壓力的對數值來決定。

在製給定燃料燃燒產物的與以上類似的熱力圖時,必須先依據該燃料各組成成分的百分比算出,當 $\alpha = 1$ 時的燃燒產物的容積百分比。然後,利用第 19—21 頁所列的 $\text{N}_2, \text{CO}_2, \text{H}_2\text{O}, \text{O}_2$ 各氣體成分的相對壓力對數值及熱焓值,再按照混合定律及已經算出的燃燒產物的容積百分比,以 $50-100^\circ\text{C}$ 的間隔求出在各種不同溫度下、該燃燒產物的 I 及 $\lg \pi_0$ 。

有了當 $\alpha = 1$ (即沒有過量空氣)時燃燒產物與濕空氣的相對壓力對數值及熱焓值之後(第 22 頁),便可在一張圖上作出這兩種混合氣體(空氣與燃燒產物)①的 I 及 $\lg \pi_0$ 與溫度函數之間的關係曲線。

現在我們擬把給定的燃料,在任何過量空氣下燃燒時的氣態產物看作是在 $\alpha = 1$ 時燃料的氣態燃燒產物和濕空氣的混合物。這樣,指定係數 α (譬如 2, 3, 4, 5 ...) 之後,即可算出當 $\alpha = 1$ 時該混合氣體中燃燒產物及空氣的體積百分比。

這樣計算非常簡易。

確定了燃料燃燒時所必需的理論空氣量 L_0 , 在這空氣中所含的水蒸汽體積以及

① 在作圖時,將數值 $[\lg \pi_0 - 9]$ 置於 $\lg \pi_0$ 標尺上較為方便。

當 $\alpha = 1$ 時燃燒產物的總體積 V° 之後,就很容易求出對任一 α 值的氣體組成百分比:

$$r_s = \frac{100 V^\circ}{V^\circ + \left(L_0 + \frac{0.124 \times L_0 d_s}{100} \right) (\alpha - 1)} \%;$$

$$r_e = 100 \left[1 - \frac{V^\circ}{V^\circ + \left(L_0 + \frac{0.124 \times L_0 d_s}{100} \right) (\alpha - 1)} \right] \%,$$

式中 r_s ——當 $\alpha = 1$ 時,燃燒產物的體積百分比;

r_e ——空氣的體積百分比;

d_s ——每標準立方公尺空氣中水蒸汽的重量,以公分計。

(按照鍋爐設備的計算標準,取 $d_s = 8$ 公分/標準立方公尺)。

如果取燃燒產物中的空氣體積百分比作為參數,那末該混合氣體的熱焓和相對壓力對數值就可把濕空氣與當 $\alpha = 1$ 時燃料燃燒產物的這些數值之間依直線比例增減法來計算,亦即

$$I_{混合} = I_e + (I_{\alpha=1} - I_e)(1 - r_e). \quad (21)$$

換句話說,如果把當 $\alpha = 1$ 時的燃燒產物與濕空氣的相對壓力對數曲線之間的間隔以及熱焓曲線之間的間隔各分成 n 等分,再把相應的點子用勻滑曲線連接起來,那末所得到的曲線,就可適用於空氣體積百分比為 $\frac{1}{n}, \frac{2}{n}, \frac{3}{n}, \dots$ 時的燃燒產物。實際上將間隔劃成 10 等分已足夠,因為這樣地採用比例增減法已很可靠了。

為了選擇適用於某一過量空氣下燃燒產物的相對壓力對數曲線及熱焓曲線,只要在熱力圖上依照上述的計算方法繪出 r_s 與 α 之間的關係曲線就行。

當 α 為任一數值時,為了要確定在標準狀況下氣態燃燒產物的分子量 μ 與比重 γ , 在熱力圖上尚需作有關 (μ) 與 (γ) 兩直線。

書中除列熱力性質表以外,尚附有鼓風爐煤氣、薩拉多夫地區煤氣、地下煤氣與重油等四種燃料的熱力圖,並取絕對零值作為使用所有這些圖形而作計算時的起點。

製圖時所取的比例尺為:對於溫度 $100^\circ = 50$ 公厘,對於熱焓 1000 大卡/模爾 $= 50$ 公厘,對於相對壓力的對數值 $1 = 100$ 公厘。

第 22 頁上示有當 $\alpha = 1$ 時按混合律算出的上述幾種燃料的燃燒產物的相對壓力對數值及熱焓 而在第 23—26 頁上則示有比熱與絕熱指數各值。

對任何一種固體、液體或氣體燃料的燃燒產物來說,都可製作如上述那樣的類似的熱力圖。在利用這些圖中,證明作法是非常簡單,並且在實際計算時,會感到既準確而又方便。

6. 製圖示例

試繪一張地下煤氣燃燒產物的熱力圖, 已知氣體的體積百分比為:

$$\text{H}_2\text{S} = 0.6\%; \text{CO}_2 = 10.3\%; \text{O}_2 = 0.2\%; \text{CO} = 18.4\%;$$

$$\text{H}_2 = 11.1\%; \text{CH}_4 = 1.8\%; \text{N}_2^{(1)} = 57.6\%.$$

(a) 讓我們先來計算 1 標準立方公尺^②上述氣體燃燒時所必需的理論空氣量:

$$\begin{aligned} L_0 &= \frac{1}{21} \left[0.5\text{H}_2 + 0.5\text{CO} + \left(m + \frac{n}{4} \right) \text{C}_m\text{H}_n + 1.5\text{H}_2 - \text{O}_2 \right] \\ &= \frac{1}{21} [0.5 \times 11.1 + 0.5 \times 18.4 + 2 \times 1.8 + 1.5 \times 0.6 - 0.2] \\ &= 0.907 \text{ 標準立方公尺/標準立方公尺.} \end{aligned}$$

(6) 然後計算當 $\alpha = 1$ 時的燃燒產物的體積百分比:

(1) 三原子氣體的體積(沒有水蒸汽)

$$\begin{aligned} V_{\text{RO}_2} &= 0.01[\text{CO}_2 + \text{CO} + \text{CH}_4 + 2\text{C}_2\text{H}_4 + \text{H}_2\text{S}] \\ &= 0.01[10.3 + 18.4 + 1.8 + 0.6] = 0.311 \text{ 標準立方公尺/標準立方公尺.} \end{aligned}$$

(2) 水蒸汽的體積

設燃料中的濕汽含量是:

$$d_s = 47.5 \text{ 公分/標準立方公尺,}$$

以及空氣中的濕汽含量是:

$$d_a = 8.0 \text{ 公分/標準立方公尺.}$$

$$\begin{aligned} V_{\text{H}_2\text{O}} &= 0.01[\text{H}_2 + 2\text{CH}_4 + 2\text{C}_2\text{H}_4 + \text{H}_2 + 0.124(d_s + \alpha L_0 d_a)] \\ &= 0.01[11.1 + 2 \times 1.8 + 0.6 + 0.124(47.5 + 0.907 \times 8.0)] \\ &= 0.221 \text{ 標準立方公尺/標準立方公尺.} \end{aligned}$$

(3) 雙原子氣體的體積

$$\begin{aligned} V_{\text{R}_2} &= 0.79L_0 + 0.01\text{N}_2^{(1)} = 0.79 \times 0.907 + 0.01 \times 57.6 \\ &= 1.293 \text{ 標準立方公尺/標準立方公尺.} \end{aligned}$$

(4) 燃燒產物的總體積

$$\begin{aligned} V^0 &= \Sigma V = V_{\text{RO}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}} + V_{\text{R}_2} = 0.311 + 0.221 + 1.293 \\ &= 1.825 \text{ 標準立方公尺/標準立方公尺.} \end{aligned}$$

當 $\alpha = 1$ 時, 燃燒產物的體積百分比:

$$r(\text{RO}_2) = \frac{V_{\text{RO}_2}}{V^0} = \frac{0.311}{1.825} = 0.1704$$

$$r(\text{H}_2\text{O}) = \frac{V_{\text{H}_2\text{O}}}{V^0} = \frac{0.221}{1.825} = 0.1211$$

$$r(\text{R}_2) = \frac{V_{\text{R}_2}}{V^0} = \frac{1.293}{1.825} = 0.7085$$

$$\dots\dots\dots 1.0000$$

① 符號 N_2 是指大氣中的氮。

② 譯者註“標準立方公尺”是指在標準狀況下 1 立方公尺氣體的體積。