

燃气的热力性质表

吴仲华 著

科学出版社

72.54
78

燃气的热力性质表

吳仲華 著

(Eksd/31)

7750/10

科 學 出 版 社

內 容 介 紹

本書包括下列各表：

(1) 液体燃料与理論空气量生成的燃气的热力性質表。表中的温度范围是从 -50°C 到 1500°C 。根据这个表和已有的空气热力性質表以及本書提出的一个方法，可以很迅速地計算各种燃料与空气比例的燃气的热力性質。

(2) 各种燃料与空气比例的燃气的相对压力表。温度自 -50°C 到 1500°C 。燃料系数自 0, 0.1, ……到 1.0。有了这种表使得燃气膨胀的計算非常簡單。

(3) 各种燃料与空气比例的燃气的定压比热表、定容比热表、比热比值表、分子量表及气体常数表。

(4) 三种气体燃料的校正系数表。

本書供燃气輪机和噴气飞机的設計及研究人員和高等学校学生之用。

燃 气 的 热 力 性 質 表

著 者 吳 仲 华

出版者 科 学 出 版 社

北京朝陽門大街117号
北京市書刊出版業營業許可証出字第061号

印刷者 中 国 科 学 院 印 刷 厂

总經售 新 华 書 店

1957年12月第一版

書号：0975

1957年12月第一次印刷

字数：28,000

(京) 道：1-605

开本：787×1092 $\frac{1}{16}$

报：1-640

印张：6

定价：(11) 道林本 1.80 元
报纸本 1.30 元

目 录

序言.....	1
一. 制表方法和說明.....	3
1. 热力学基本方程.....	3
2. 燃燒产物的热力性質与燃料系数的关系	4
3. 第 1 表說明	7
4. 第 2 表說明	8
5. 第 3 表說明	8
6. 第 4 表說明	8
7. 第 5 表說明	8
8. 第 6 表說明	9
二. 在燃燒室和后燃室中产生給定温度的燃气所需的燃料与空气比例.....	9
三. 非 C_8H_{16} 燃料的燃气的热力性質	11
四. 例 題	13
五. 燃气的热力性質表	25
第 1 表 各种燃料系数燃气的热力性質	26
第 2 表 系数 A 和 B	88
第 3 表 各种燃料系数燃气的定压比热 C_p	89
第 4 表 各种燃料系数燃气的定容比热 C_v	90
第 5 表 各种燃料系数燃气的比热比值 k	91
第 6 表 各种燃料系数燃气的分子量 μ 和气体常数 R	92
第 7 表 四种燃料的校正系数 ξ 和 ζ	92

序 言

在做燃气輪机和冲压式噴气推进机的循环分析工作和設計計算工作时，以及在上述輪机中各处測量得到的气体状态进行輪机的性能分析工作和試驗研究工作时，我們必須要有精确的燃燒产物的热力性質数据。一般講来，用現有的几个热力性質圖来做上述各种計算是不够准确的，而現有的兩個热力性質表[1,2]，也不能完全滿足上述的需要。参考文献[1]給出用公制單位的六种气体和空气的热力性質詳表，但是只給了一个只包括十九个温度的重油和三种气体燃料与理論量空气的燃燒产物的热力性質表。前者当然可以用来計算各种燃料成分燃燒产物的热力性質，但不够簡捷；后者因为温度間隔太大，应用时不够詳細和准确。参考文献[2]給出用英制單位的 C_8H_{18} 与兩倍和四倍理論空气量的燃燒产物的热力性質詳表。应用这两个表时，存在着变换單位和用內插或外插法来求数值的不方便。尤其是在燃燒室和后燃室的計算中，因为結構强度的限制，燃燒产物的温度不能超过某个一定的数值，应用这些表来計算應該采用的燃料与空气的比例时，又得采用逐步試算法，使得計算非常繁复。

作者在参考文献[3]中曾就通常遇到的空气系数大于1的燃燒产物的組成物和它的热力性質加以分析，并得到一結論：这种燃燒产物的热力性質是可以很簡單地从任何其他兩個燃燒产物的热力性質来計算的。这两个燃燒产物，一个可采用空气系数为1的燃燒产物，即燃料与理論量空气的燃燒产物；一个可采用空气系数为無限大的燃燒产物，即純粹空气。

在参考文献[1]中我們已經有了一個用公制單位的空气的热力性質詳表。本書的主要内容是一个用公制單位、根据最新热力学数据計算出来的、与参考文献[1]的空气表同样詳尽的、燃料为 C_8H_{18} 的、空气系数为1的燃燒产物的各种热力性質以及燃料系数为0,0.1, ……1.0等数值的相对压力表。利用这个表，我們可以很簡單地算出各种燃料成分的燃燒产物的热力性質。計算的方法是 and 湿蒸汽的热力性質計算法完全相同的，只是在燃燒产物的計算中用到的一个系数不正好等于燃燒产物的燃料系数而已。这个系数是燃料系数的一个很簡單的函数，本書的第2表列出了它在燃料系数为0,0.01, ……1.00时的数值。

接着在本書的第3表到第5表中，列出了在35个温度下，燃料系数为0,0.1, ……1.0的燃气的定压比热，定容比热和比热比值；在第6表中列出了燃料系数为0,0.1, ……1.0的燃气的分子量和气体常数。

利用了分析得到的燃燒产物的热力性質与燃料系数的关系,作者推导出两个公式。这两个公式可以利用本書所給各表,直接算出在燃气輪机和冲压式噴气推进机中的燃燒室以及在燃气輪机的再热室和在燃气輪式噴气推进机的后燃室中,产生一定温度的燃气所需的燃料与空气的比例。

最后,本書提出了一个把上述各种热力性質表和公式应用到非 C_8H_{18} 液体燃料和各种气体燃料与各种比例空气产生的燃气的方法,在第 7 表中給出了在 18 个温度下需用校正系数的数值,并且在最后一节中用 9 个例題來說明如何应用書中各表和各式来計算燃燒、再燃燒、以及其他包括各种燃料系数的燃气的热力过程。

在本書各表的制作过程中,作者曾得到清华大学动力机械系热 8 班同学的热心帮助,完成了第一表的第一次計算。該表和其他各表經過第二次复算后,最后又由中国科学院动力研究室师应熙和蔣惠娟同志作了仔細的差值分析并且改动了一些数字的最后一位数,使得这些数值的变化更为平滑。書中各章和第 4 章中的例題也曾得到清华大学动力机械系蔡睿賢同志的詳細校閱和核对。对于这些同志的帮助作者表示深切的謝意。

吳仲华

1956年12月于北京清华大学

一. 制表方法和說明

1. 热力学基本方程

在燃燒产物(以下简称燃气)的一般应用中,它是遵循理想气体的状态方程的。所以它的压力、比容和温度满足下列方程:

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

由于遵循了方程(1),燃燒产物的内能 u 和焓 i 都只是温度的函数,所以在表中这些热力性质都是只对应于温度而排列的。

可是燃气的另外一个重要热力性质——熵, s , 是温度和压力的函数, 因之不能同样简单地只是对应于温度来排列。但是, 在热力学上熵的主要用处是在求得某个定熵过程中其他热力性质(如压力 p 等)的变化, 而这些性质在定熵过程中的变化是可以证明只是温度的函数的: 首先在热力学中我们有列基本方程

$$T ds = di - v dp. \quad (2)$$

对理想气体来说, 因为

$$di = c_p dT, \quad (3)$$

所以

$$T ds = c_p dT - v dp. \quad (4)$$

将第(1)式代入第(4)式后, 我们得到

$$ds = c_p \frac{dT}{T} - R \frac{dp}{p}.$$

将上式积分后得到

$$s_2 - s_1 = \int_{T_1}^{T_2} \frac{c_p}{T} dT - R \ln \frac{p_2}{p_1}. \quad (5)$$

因此在定熵过程中

$$\ln \frac{p_2}{p_1} = \frac{1}{R} \int_{T_1}^{T_2} \frac{c_p}{T} dT. \quad (6)$$

现在我们可以采取一个标准温度 T_0 作为 T_1 来计算上式右边的函数, 并令

$$s^\circ = \int_{T_0}^T \frac{c_p}{T} dT, \quad (7)$$

那末

$$\ln \frac{p}{p_0} = \frac{s^\circ}{R}. \quad (8)$$

因为 c_p 只是温度的函数, 选择了一定的 T_0 后, s° 或 $\frac{p}{p_0}$ 都只是 T 的函数了。这种在定

熵过程中的相对应于 T_0 温度及 p_0 压力的压力比称为相对压力 [1, 2], 并以 π° 来代表它。在燃气轮机和冲压式喷气推进机的计算中, π° 是个非常有用的热力性质, 因此在本书的热力性质表中除了给出在各种温度下 U, I 的数值外, 也给出了 π° 的数值。

有了在各个温度下的相对压力后, 在一个定熵过程中任何两个温度下的压力比就可以用下式来计算:

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{p_2/p_0}{p_1/p_0} = \frac{\pi_2^\circ}{\pi_1^\circ} \quad (9)$$

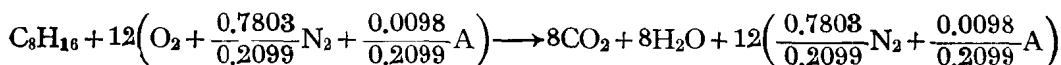
假使我们要知道在非定熵过程中熵的变化, 我们可以用第 (5) 式来计算它。把第 (7) 式代入第 (5) 式后, 可得

$$s_2 - s_1 = s_2^\circ - s_1^\circ - R \ln \frac{p_2}{p_1} \quad (10)$$

2. 燃烧产物的热力性质与燃料系数的关系

文献 [4] 曾举例证明, 假使空气系数或燃料系数是一样的话, 那么根据燃料成分为 $(CH_2)_n$ 并以摩尔为单位作成的燃气热力性质表, 是足够正确地用来作为燃料成分自 $(CH_4)_n$ 到 $(CH_3)_n$ 的燃气的热力性质表的。因此, 本书中所给的燃气的热力性质表是根据 C_8H_{16} 来制作的。

当燃气的温度在 1500°C 以下时, 气体的分解现象可以略去不计。1 摩尔 C_8H_{16} 和理论量空气的燃烧方程是

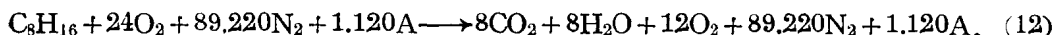


或

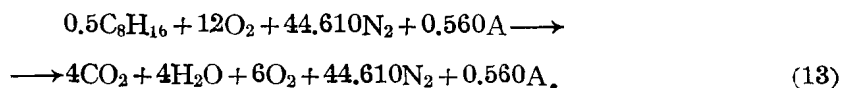


方程 (11) 表明 1 摩尔 C_8H_{16} 和 57.170 摩尔空气燃烧后得到了 61.170 摩尔的燃烧产物。

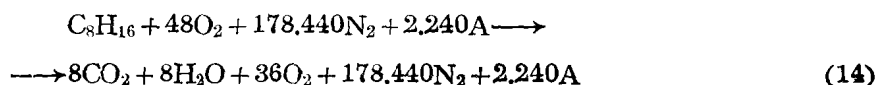
燃料 C_8H_{16} 在两倍理论量的空气中完全燃烧的化学方程为



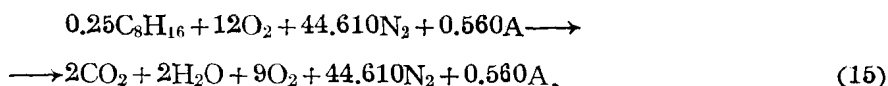
假使我们不设空气系数为 2 而设燃料系数为 0.5, 那末同一的燃烧可以写为



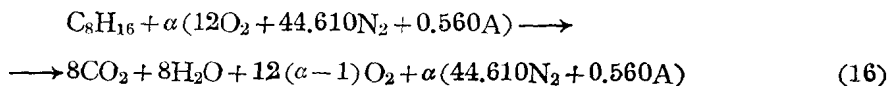
同样地, 空气系数为 4 或燃料系数为 0.25 的燃烧方程为:



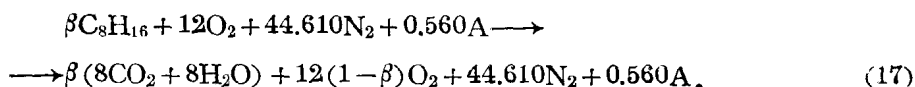
和



由以上各式推出空气系数为 α 或燃料系数为 β 的燃烧方程为:



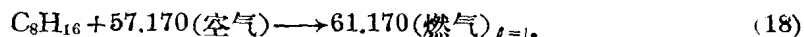
和



当然,实际上方程(12), (14), (16)各与方程(13), (15), (17)相同,因为 $\alpha \cdot \beta = 1$.

燃烧产物的热力性质通常是按照其组成气体的数量和它们的热力性质计算出来的。这样,每一种成分的燃烧产物就需要单独计算一次。

事实上,这种计算可以减少到只是一次,因为我们可以把任何 α 值或 β 值的燃烧产物的热力性质写成为空气的热力性质和任一选定的 α (或 β) 值的燃烧产物的热力性质的简单函数。假使我们采用这个选定的 α 或 β 值为 1, 并且为简便起见把 1 模尔的空气写作(空气)、把 1 模尔 β 为 1 的燃烧产物写作(燃气) $_{\beta=1}$, 那末方程 (11) 可写作



同时,方程 (13), (15), (17) 右边的 59.170 模尔(燃气) $_{\beta=0.5}$, 58.170 模尔(燃气) $_{\beta=0.25}$, $(57.170 + 4\beta)$ 模尔(燃气) $_{\beta}$ 可以分别写作

$$59.170(\text{燃气})_{\beta=0.5} = 0.5 \times 61.170(\text{燃气})_{\beta=1} + 0.5 \times 57.170(\text{空气}), \quad (19)$$

$$58.170(\text{燃气})_{\beta=0.25} = 0.25 \times 61.170(\text{燃气})_{\beta=1} + 0.75 \times 57.170(\text{空气}), \quad (20)$$

$$(57.170 + 4\beta)(\text{燃气})_{\beta} = 61.170\beta(\text{燃气})_{\beta=1} + (1 - \beta)57.170(\text{空气}). \quad (21)$$

[在上式中,燃料系数为 β 的燃气简写为(燃气) $_{\beta}$.]

将方程(19), (20), (21), 分别代入方程(13), (15), (17)后,我们得到

$$0.5\text{C}_8\text{H}_{16} + 57.170(\text{空气}) \longrightarrow 30.585(\text{燃气})_{\beta=1} + 28.585(\text{空气}), \quad (22)$$

$$0.25\text{C}_8\text{H}_{16} + 57.170(\text{空气}) \longrightarrow 15.293(\text{燃气})_{\beta=1} + 42.875(\text{空气}), \quad (23)$$

$$\beta\text{C}_8\text{H}_{16} + 57.170(\text{空气}) \longrightarrow 61.170\beta(\text{燃气})_{\beta=1} + 57.170(1 - \beta)(\text{空气}). \quad (24)$$

[在上面三式中, 左边(空气)的组成气体成分是和右边(空气)的组成气体成分一样的, 但右边空气的温度较左边空气的温度为高。]

方程(22), (23), (24)說明各种成分的燃燒产物可以作为若干(燃气) $_{\beta=1}$ 和若干(空气) $_{\beta=0}$ 之和。把燃料系数为 β 的 $(57.170 + 4\beta)$ 模尔的燃气看作为 61.170β 模尔的(燃气) $_{\beta=1}$ 和 $57.170(1-\beta)$ 模尔的空气之和以后, 我們就可以应用混合气体的混合定律来計算燃气的热力性質了。現在用 A, B 来分別代表在1模尔(燃气) $_{\beta}$ 中, 空气和(燃气) $_{\beta=1}$ 的模尔数, 即

$$A = \frac{57.170(1-\beta)}{57.170 + 4\beta}, \quad (25)$$

$$B = \frac{61.170\beta}{57.170 + 4\beta}. \quad (26)$$

于是1模尔燃料系数为 β 的燃气的热力性質 $C, U, I, S^\circ, \pi^\circ$ 等应各为:

$$C_\beta = AC_{\beta=0} + BC_{\beta=1}, \quad (27)$$

$$U_\beta = AU_{\beta=0} + BU_{\beta=1}, \quad (28)$$

$$I_\beta = AI_{\beta=0} + BI_{\beta=1}, \quad (29)$$

$$S^\circ_\beta = AS^\circ_{\beta=0} + BS^\circ_{\beta=1}, \quad (30)$$

$$\lg \pi^\circ_\beta = \frac{S^\circ_\beta}{\mu R} = A \lg \pi^\circ_{\beta=0} + B \lg \pi^\circ_{\beta=1}. \quad (31)$$

上面五个公式还可以写成下列其他两种形式:

$$C_\beta = C_{\beta=0} + B(C_{\beta=1} - C_{\beta=0}), \quad (32)$$

$$U_\beta = U_{\beta=0} + B(U_{\beta=1} - U_{\beta=0}), \quad (33)$$

$$I_\beta = I_{\beta=0} + B(I_{\beta=1} - I_{\beta=0}), \quad (34)$$

$$S^\circ_\beta = S^\circ_{\beta=0} + B(S^\circ_{\beta=1} - S^\circ_{\beta=0}), \quad (35)$$

$$\lg \pi^\circ_\beta = \lg \pi^\circ_{\beta=0} + B(\lg \pi^\circ_{\beta=1} - \lg \pi^\circ_{\beta=0}), \quad (36)$$

和

$$C_\beta = C_{\beta=1} - A(C_{\beta=1} - C_{\beta=0}), \quad (37)$$

$$U_\beta = U_{\beta=1} - A(U_{\beta=1} - U_{\beta=0}), \quad (38)$$

$$I_\beta = I_{\beta=1} - A(I_{\beta=1} - I_{\beta=0}), \quad (39)$$

$$S^\circ_\beta = S^\circ_{\beta=1} - A(S^\circ_{\beta=1} - S^\circ_{\beta=0}), \quad (40)$$

$$\lg \pi^\circ_\beta = \lg \pi^\circ_{\beta=1} - A(\lg \pi^\circ_{\beta=1} - \lg \pi^\circ_{\beta=0}). \quad (41)$$

假使我們把燃气的 B 和湿蒸汽的干度相比, 把燃气的 A 和湿蒸汽的湿度相比, 把 $I_{\beta=0}$ 和饱和水的 I 相比, 把 $I_{\beta=1}$ 和饱和蒸汽的 I 相比, 那末我們看到上面这些公式是和湿蒸汽热力性質的計算公式完全相似的。两者惟一不同的地方是上列各式中的 B 和 A

不正好分别等于燃气的燃料系数 β 和空气系数 α 而已。式(25), (26) 给出 B 和 A 与 β 间的关系。知道了 β 后, 求 B 或 A 是相当简单的。书中的第 2 表给出了在 101 个 β 数值下 ($\beta=0, 0.01, \dots, 1$) 的 A 和 B 的数值。在一般的计算中, 这张表是足够详细了。在特别准确的计算中, 我们可以直接从 (25) 或 (26) 式来计算 A 或 B 。

和在湿蒸汽的热力性质的计算中一样, 在用计算尺计算这些性质时, 假使 β 接近于 0, 以用 (32) 式到 (36) 式较为准确。假若 β 接近于 1, 则以用 (37) 式到 (41) 式较为准确。同时这两组公式中只包括了一个系数 A 或 B 和一个乘法, 因此在书中的热力性质表中特别列出了 $(I_{\beta=1} - I_{\beta=0})$ 和 $(\lg \pi_{\beta=1}^\circ - \lg \pi_{\beta=0}^\circ)$ 的数值以便应用。在用计算机计算时, 虽然用以上三组公式中任何一组都得到同样的准确度, 但是仍以用第二或第三组较为迅速。

用这种方法来计算各种燃料和空气比例的燃气的热力性质, 不但是非常简单迅速, 并且对初学者来讲是最容易理解和熟悉应用的。

3. 第 1 表 说 明

第 1 表列出了温度从 -50°C 到 1500°C , 每间隔 1°C , 空气和 (燃气) $_{\beta=1}$ 的 $U, I, \lg \pi^\circ, (I_{\beta=1} - I_{\beta=0}), (\lg \pi_{\beta=1}^\circ - \lg \pi_{\beta=0}^\circ)$, 以及 $\pi_{\beta=0}^\circ, \pi_{\beta=0.1}^\circ, \dots, \pi_{\beta=1}^\circ$ 等。其中, 空气的 U, I 和 π° 是直接取自文献 [1] 的, 其余各项的计算方法说明如下:

β 为 1 的燃气的 I 是根据 (11) 式所给的燃气的组成气体的比例和文献 [1] 所给的这些气体的 I 计算出来的。在计算时曾利用了该文献所给的大气氮 (N_2) 的 I 来替代氮和氩的 I , 即 1 摩尔 (燃气) $_{\beta=1}$ 的组成气体成分看作是:

N_2 : 0.738434 摩尔;

H_2O : 0.130783 摩尔;

CO_2 : 0.130783 摩尔。

β 为 1 的燃气的 U 是根据下式来计算的:

$$U = I - 1.98581T. \quad (42)$$

表上的 $\lg \pi_{\beta=1}^\circ$ 是这样计算的: 根据 (燃气) $_{\beta=1}$ 的组成气体成分和文献 [1] 所给的这些气体的 S° , 先算出 $S_{\beta=1}^\circ$, 然后再用 (8) 式来计算 $\lg \pi_{\beta=1}^\circ$ (表上给的数目是算出的数目减去 10)。

在实际应用中, 知道了 β 和温度来求 π° 是相当简单的。我们只须应用 (36) 式或 (41) 式和表上给出的 $\lg \pi_{\beta=0}^\circ$ 或 $\lg \pi_{\beta=1}^\circ$ 和 $(\lg \pi_{\beta=1}^\circ - \lg \pi_{\beta=0}^\circ)$ 即可。可是反过来计算时, 就是知道了 $\pi_{\beta=1}^\circ$ 来求相对应的温度时, 我们便得用上述方法试算二、三个温度下的 $\pi_{\beta=1}^\circ$ 才能求出应有的温度。因为在实际问题中常常遇到这种计算 (如燃气自一高压状态

膨脹至一低压力状态), 为了使得計算迅速起見, 特將在每一温度下, β 为 0.1, 0.2, …… , 0.9 的 π° 值根据 (36) 式加以計算, 并且和其他热力性質一同列在第 1 表中。在用計算尺計算时, 假使 β 介乎表列各数时, 用最接近 β 的 π° 值或以观察直綫插入法来求 π° 值就够准确了。在需要更准确的答案时 (用計算机計算时), 这样求出的近似答案也可以把試算的次数减少到只是一、二次。

根据文献[1]中五位有效数的 S° 計算出来的 $\lg \pi_{\beta=0}^\circ, \lg \pi_{\beta=1}^\circ - \lg \pi_{\beta=0}^\circ, \lg \pi_{\beta=1}^\circ$ 随着温度的变化在第五位数上并不潤滑。計算了它們的第一、第二差值后, 看出它們只准确到第四位。因此在表中, 这些数字只給到第四位 (事实上, 原始数据比热也只給到第四位)

4. 第 2 表說明

第 2 表列出了 β 为 0, 0.01, 0.02, …… 1.00 等值时, A 和 B 的数值, 这些数值是根据 (25), (26) 兩式計算得来的。在普通計算中, 如 β 值介乎表列各数之間, 可以用直綫插入法来求 A 或 B 值。如果需要更精确的答数, 可以直接用 (25) 式或 (26) 式來計算。

5. 第 3 表說明

第 3 表列出了在 -50°C 到 1500°C 間 35 个温度下, β 为 0, 0.1, 0.2, …… , 1.0 的燃气的定压比热。这些数值的計算方法是和 π° 的計算方法完全一样的。我們看到燃气的定压比热随着温度的增高而增大, 同时它增大的数值随着 β 的增大而增大。在同一温度下, 燃气的定压比热随着 β 增大而增大。

6. 第 4 表說明

第 4 表列出了和第 3 表相同的 35 个温度下 β 为 0, 0.1, 0.2, …… , 1.0 的燃气的定容比热。它們是根据第 3 表中的定压比热和下式計算得来的。

$$C_v = C_p - 1.9858. \quad (43)$$

定容比热的变化情形是和定压比热的变化情形相似的。

7. 第 5 表說明

把第 3 表中的 C_p 除以第 4 表中相对应的 C_v 就得到第 5 表中的比热比值 k 。我們从表上看到各种燃气的比热比值随着温度的增高而减小, 减小的程度則随着 β 的增大而略为增大。在同一温度下, 它随着 β 增大而减小。在第 5 表中, k 的最大值为 1.401, k

的最小值为1.259。

8. 第 6 表 說 明

从(17)式我們知道 β 摩尔 C_8H_{16} 和 57.170 摩尔空气产生了 $(57.170 + 4\beta)$ 摩尔的燃气。但燃气的重量等于混合物的重量, 即 $(112.21\beta + 1656.2)$ 千克。所以燃气的分子量

$$\mu = \frac{112.21\beta + 1656.2}{57.170 + 4\beta} \frac{\text{千克}}{\text{摩尔}}, \quad (44)$$

而燃气的气体常数则等于

$$R = \frac{847.83}{\mu} \frac{\text{千克-米}}{\text{千克-度}}. \quad (45)$$

根据上面兩式計算得到的 μ 和 R 列于第 6 表中。因为它们和 β 間的变化相当小, 所以只計算了 β 自 0 到 1 的十一个 β 下的数值。

二. 在燃燒室和后燃室中产生給定温度 的燃气所需的燃料与空气比例

固定式燃气輪机的功率、燃气輪式和冲压式噴气推进机的推力都是被它們結構上所能承受的最大温度所限制的。現在利用在一. 2 节中所得到的燃气的热力性質和燃料系数的簡單关系, 我們可以得到一个簡單的公式来直接計算在給定的某个燃气温度条件下所需的燃料系数。

在圖 1 所示的穩定燃燒过程中, 空气自左端进入燃燒室, 它的温度是 T_a , 它的焓是 $I_{\beta=0}$, 它的速度是 V_a 。进入燃燒室燃料的温度是 T_f , 它的焓是 I_f , 它的速度可略去不計。燃气在右端流出燃燒室, 它的温度是 T_p , 它的焓是 I_p , 它的速度是 V_p 。燃燒室右端內壁上所受到的温度是燃气的滯止温度或总温度 T_p^* 。

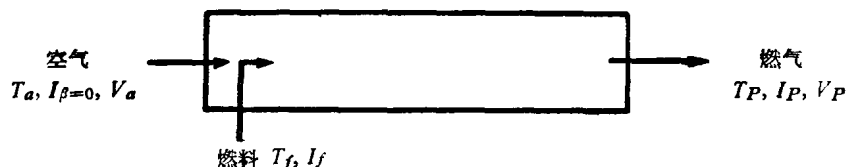


圖 1. 穩定燃燒

將热力学第一定律应用到这种稳定流动的燃燒过程后, 我們得到下列方程:

$$N_R I_R^* = N_P I_P^* + N_f Q, \quad (46)$$

式中 N 代表摩尔数, Q 代表燃燒每 1 摩尔燃料时自燃燒室内部气体傳散到外部的热能,

下角注 R 代表反应物, 下角注 P 代表燃烧产物, 下角注 f 代表燃料, 上角注 $*$ 代表滞止或速度为零的数值。解方程(46)时, 我們須利用在某一温度 T' 时 (通常为 25°C) 測定的液体燃料变到气体燃烧产物的“燃烧焓差”或“發热量”如下(参閱圖 2):

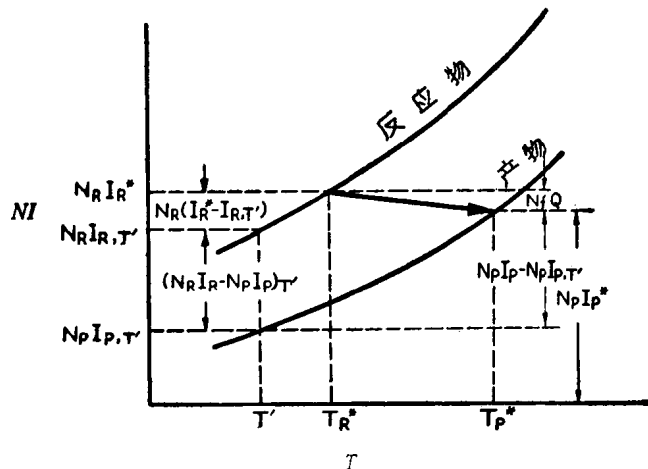


圖 2. 稳定燃烧的 $NI-T$ 圖

$$N_R(I_R^* - I_{R,T'}) - (N_P I_{P,T'} - N_R I_{R,T'}) = N_P(I_P^* - I_{P,T'}) + N_f Q, \quad (47)$$

式中 $(N_P I_{P,T'} - N_R I_{R,T'})$ 为反应物在温度为 T' 时低速燃烧后焓的增加, 可簡單地用 $N_f(I_{RP})_{T'}$ 表示之 ($-I_{RP}$ 即为通常所称的“發热量”)。假使再把上式中反应物中空气和燃料的焓分别写出, 那末 β 模尔燃料和 57.170 模尔空气的燃烧的热力学第一定律方程为(参閱公式 21)

$$\begin{aligned} & 57.170[(I_{\beta=0})_{T_P^*} - (I_{\beta=0})_{T'}] + \beta[(I_f)_{T_f} - (I_f)_{T'} + (-I_{RP})_{T'}] = \\ & = 57.170(1-\beta)[(I_{\beta=0})_{T_P^*} - (I_{\beta=0})_{T'}] + 61.170\beta[(I_{\beta=1})_{T_P^*} - (I_{\beta=1})_{T'}] + \beta Q. \end{aligned} \quad (48)$$

从上式求得燃烧所需的燃料系数为

$$\beta = \frac{57.170[(I_{\beta=0})_{T_P^*} - (I_{\beta=0})_{T'}]}{[-(I_{RP})_{T'} - Q + (I_f)_{T_f} - (I_f)_{T'}] + 57.170[(I_{\beta=0})_{T_P^*} - (I_{\beta=0})_{T'}] - 61.170[(I_{\beta=1})_{T_P^*} - (I_{\beta=1})_{T'}]}. \quad (49)$$

虽然公式(49)看起来相当長, 但是它只包括了几个簡單直接的計算, 要比用逐步試算法再加上查表时的內插或外插簡單和迅速得多了。式中 $[(I_f)_{T_f} - (I_f)_{T'}]$ 比其他各項小得多, 通常可略去或用 $0.5u(T_f - T')$ 來計算。

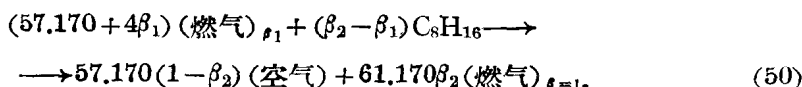
在通常工程上所需的准确要求下, (49) 式是可以用来計算在空气中燃烧各种碳氢化合物所需的燃料系数的。求出燃料系数后, 乘以該燃料的理論燃料——空气比例, 就得到所要的燃料与空气的比例。如果要得到更精确的答案, 我們可以用上面的方法

为每一种燃料推演出像(49)式那样的一个公式。

假使要考虑到燃烧效率对于所求燃料系数的影响, 我們可以把(49)式稍加修改。一个方法是把燃烧效率加在 $(-I_{RP})$ 前面, 另一个方法是把燃烧效率直接加在 β 前面。

后燃室或“重热室”所需燃料系数的求法

在燃气輪推进机中的后燃室和燃气輪机设备的重热室中, 反应物是一种燃料系数較低的燃气和新鮮燃料。如果要計算再加入多少新鮮燃料, 使能产生某一给定温度的燃气, 我們必須把(49)式加以修改。为方便起见, 我們考虑 $(57.170 + 4\beta_1)$ 模尔的燃气和 $(\beta_2 - \beta_1)$ 模尔的新鮮燃料进入后燃室或重热室, 它們的燃燒方程是



將热力学第一定律应用到这种稳定流动的燃燒后, 就得出和方程(48)相似的下列方程:

$$\begin{aligned} (57.170 + 4\beta_1) [(I_{\beta=\beta_1})_{T_g^*} - (I_{\beta=\beta_1})_{T'}] + (\beta_2 - \beta_1) [(I_f)_{T_f} - (I_f)_{T'} + (-I_{RP})_{T'}] = \\ = 57.170(1 - \beta_2) [(I_{\beta=0})_{T_p^*} - (I_{\beta=0})_{T'}] + 61.170\beta_2 [(I_{\beta=\beta_1})_{T_p^*} - (I_{\beta=\beta_1})_{T'}] + (\beta_2 - \beta_1) Q, \end{aligned}$$

式中 T_g^* 为进入后燃室或重热室的稀燃气的滞止温度, T_p^* 则为最后燃气的滞止温度。

將上式移項后可得出

$$\begin{aligned} \beta_2 - \beta_1 = \\ \frac{57.170(1 - \beta_1) [(I_{\beta=0})_{T_p^*} - (I_{\beta=0})_{T'}] - (57.170 + 4\beta_1) \times [(I_{\beta=\beta_1})_{T_g^*} - (I_{\beta=\beta_1})_{T'}] + 61.170\beta_1 [(I_{\beta=\beta_1})_{T_p^*} - (I_{\beta=\beta_1})_{T'}]}{[(-I_{RP})_{T'} - Q + (I_f)_{T_f} - (I_f)_{T'}] + 57.170 [(I_{\beta=0})_{T_p^*} - (I_{\beta=0})_{T'}] - 61.170 [(I_{\beta=\beta_1})_{T_p^*} - (I_{\beta=\beta_1})_{T'}]} \end{aligned} \quad (51)$$

上式也可以用来計算在柴油机中的混合气作等压燃燒时要产生一定燃气温度所需的燃料系数。在这样应用时, 式中的滞止焓应该替代以普通的焓, 同时 T_g^* 代表殘气和新鮮空气在压缩过程完畢时的温度。

三. 非 C_8H_{16} 燃料的燃气的热力性質

前面說明的各热力性質表和燃料系数的求法都是根据 C_8H_{16} 这一个燃料的。文献[4]中曾經举例比較了在各种温度下燃料成分为 $(\text{CH}_1)_n$, $(\text{CH}_2)_n$ 和 $(\text{CH}_3)_n$, β 为 0.25 和 0.5 的各种燃气的热力性質。比較結果說明, 燃气在通常遇到的温度 (0°C 到 1000°C) 和压力比 (1 到 18) 下, β 为 0.25 的各种燃料的燃气从同一起始温度经过同一压力比的膨胀后, 它們温度的差別不到 0.5°C , 焓的差別不到 0.05%。当 β 为 0.5 时, 它們的温度差別不到 1°C , 焓的差別不到 0.1%。因此在通常情况下, 根据 C_8H_{16} 制成的热力性質

表是可以用来计算其他燃料的燃气的热力过程的(应用时需注意到燃料系数必须相同,并且用模尔作单位)。

当燃气的燃料系数大于 0.5 时,或燃料的碳氢比例超出上述范围时,我们采用了下述校正系数方法后仍旧可以利用书中各表来计算这种燃气的热力性质。

假使我们把在某一个温度下的任意燃料与理论空气量(即 β 为 1) 的燃烧产物的热力性质 $I_{\beta=1}$ 和 $\lg \pi_{\beta=1}^\circ$ 写为

$$I_{\beta=1} = I_{\beta=0} + \xi(I_{\beta=1} - I_{\beta=0})_{C_8H_{16}}, \quad (52)$$

$$\lg \pi_{\beta=1}^\circ = \lg \pi_{\beta=0}^\circ + \zeta(\lg \pi_{\beta=1}^\circ - \lg \pi_{\beta=0}^\circ)_{C_8H_{16}}, \quad (53)$$

那末在同一温度下,任何 β 的这种燃气的热力性质

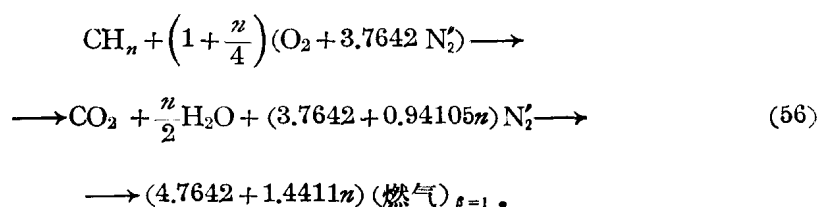
$$I_\beta = I_{\beta=0} + B(I_{\beta=1} - I_{\beta=0}) = I_{\beta=0} + B\xi(I_{\beta=1} - I_{\beta=0})_{C_8H_{16}}, \quad (54)$$

$$\lg \pi_\beta^\circ = \lg \pi_{\beta=0}^\circ + B(\lg \pi_{\beta=1}^\circ - \lg \pi_{\beta=0}^\circ) = \lg \pi_{\beta=0}^\circ + B\zeta(\lg \pi_{\beta=1}^\circ - \lg \pi_{\beta=0}^\circ)_{C_8H_{16}}. \quad (55)$$

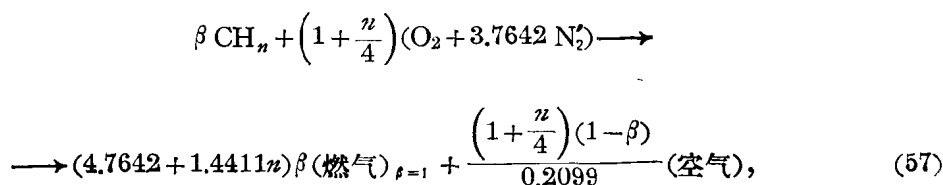
(54), (55) 两式是和 (34), (36) 两式很相似的,只是多了一个系数 ξ 或 ζ 。这两个系数都是温度的函数,但是它们随着温度的变化是比较小的。因此我们只需算出一些间隔相当大的温度下的数值后,把它们列成一表就足够应用了。

譬如根据文献 [1] 中所列出的在 19 个温度下, β 为 1, 燃料为鼓风炉煤气、地下煤气、重油和薩拉多夫煤气的 I 和 $\lg \pi^\circ$ 值,我们就可以算出列在第 7 表中的 ξ 和 ζ 值。从表上我们看出,除了在较低的温度下(200°C 以下), ξ 和 ζ 值随着温度的变化是不大的。

(54) 和 (55) 两式中的 B 值,须根据燃料的成分来计算。各种碳氢化合物的燃料可以用 CH_n 来代表。它们与理论空气量的燃烧方程是



于是,燃料系数为 β 的燃烧方程可以写为



因此,

$$A = \frac{\left(1 + \frac{n}{4}\right)(1 - \beta)}{\left(1 + \frac{n}{4}\right) + 0.052476 n \beta}, \quad (58)$$

$$B = \frac{(1 + 0.30248 n) \beta}{\left(1 + \frac{n}{4}\right) + 0.052476 n \beta}. \quad (59)$$

在 $n=2$ 时, (58), (59) 式简化成 (25), (26) 式。

从文献 [1] 所给的重油和薩拉多夫天然煤气与理論空气量所产生的燃气的組成气体的比例中, 得出这些燃料的 n 值为 2.350 和 4.124。我們注意到最后一个数字是大于 3 的。

四. 例 題

下面 9 个例题是用来说明如何应用書中所给的几張热力性質表和一些公式来計算燃燒、再燃燒以及其他各种包括各种燃料与空气比例的燃燒产物的热力过程。其中包括有固定式燃气輪机, 燃气輪式噴气推进机, 冲压式噴气推进机, 以及后燃室的計算等。

【例題 1】稳定流动的燃燒 稳定地流进一燃燒室的空气的滯止温度为 180°C , 加入液体燃料 C_8H_{16} 的温度为 25°C , 燃料的燃燒焓差为 $-10,643$ 千卡/千克。假使燃燒是絕热的, 并且流出燃燒室的燃气的滯止温度为 800°C , 燃料与空气的比例应该为多少?

【解】 从第 1 表中查出:

在 25°C 时, $I_{\beta=0} = 2064.1$ 千卡/摩尔,

$I_{\beta=1} = 2126.6$ 千卡/摩尔,

在 180°C 时, $I_{\beta=0} = 3148.1$ 千卡/摩尔,

在 800°C 时, $I_{\beta=0} = 7817.9$ 千卡/摩尔,

$I_{\beta=1} = 8394.7$ 千卡/摩尔。

根据第 (49) 式,

$$\begin{aligned} \beta &= \frac{57.170(7817.9 - 3148.1)}{112.21 \times 10643 + 57.170(7817.9 - 2064.1) - 61.170(8394.7 - 2126.6)} = \\ &= \frac{266970}{1139800} = 0.2342, \end{aligned}$$

所以燃料与空气的比例应为

$$0.2342 \times \frac{112.21}{28.970 \times 57.170} = 0.2342 \times 0.06775 = 0.01587.$$

【例題 2】燃气的膨脹 (1) C_8H_{16} 与 5 倍理論量的空气的燃燒产物在稳定流动情