

燃气的热力性质表

吴 仲 华 著

科 学 出 版 社

內 容 簡 介

本书包括下列各表:

(1) 液体燃料与理論量空气燃烧产物的热力性質表。表中的溫度范围是从 -50°C 到 1500°C 。根据这个表和空气的热力性質及本书的方法,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焓与相对压力表。溫度自 -50°C 到 1500°C 。燃料系数自 0, 0.1, 到 1.0。根据这个表可以更簡捷地計算各种燃气的膨胀过程。

(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、分子量表以及气体常数表。

(4) 三种气体燃料的校正系数表。

本书供燃气輪机和噴气推进机的設計与研究人員以及高等学校燃气輪机和噴气推进机专业学生之用。

燃 气 的 热 力 性 質 表

著 者	吳 仲 华
出版者	科 学 出 版 社 北京 朝 阳 門 大 街 117 号 北京市书刊出版业营业許可証出字第 061 号
印刷者	北 京 新 华 印 刷 厂
总經售	新 华 书 店

1959 年 9 月 第 二 版	书号:1905 字数:148,000
1959 年 9 月 第一次印刷	开本:787×1092 1/16
(京) 0001—2,700	印张:7 3/4

定价: 1.10 元

第一版序言

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，以及在对上述輪机中各处測量得到的气体状态进行它們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料与各种比例空气的燃烧产物的热力性質数据。一般讲来，用現有的几个热力性質图来做上述各种計算是不够准确的，而現有的两个热力性質表 [1,2]* 也不能完全滿足上述的需要。参考文献 [1] 給出用公制单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烧产物的热力性質表。前者当然可以用来計算燃料与各种比例空气的燃烧产物的热力性質，但不够簡捷；后者因为温度間隔太大，应用时不够准确和方便。参考文献 [2] 給出用英制单位的 C_2H_6 与两倍和四倍理論量空气的燃烧产物的热力性質詳表。应用这两个表时，存在着变换单位和用內插或外插法来求数值的不方便。尤其是在燃烧室和后燃室的計算中，因为材料的限制，燃烧产物的温度不能超过某个一定的数值，应用这些表来計算应该采用的燃料与空气的比例时，又得采用逐步試算法，使得計算很繁。

作者在参考文献 [3] 中曾就通常遇到的空气系数大于 1 的燃烧产物的組成物和它的热力性質加以分析，并得到一結論：这种燃烧产物的热力性質是可以很簡單地从任何其他两个燃烧产物的热力性質来計算的；这两个燃烧产物，一个可以采用空气系数为 1 的燃烧产物，即燃料与理論量空气的燃烧产物，一个可以采用空气系数为无限大的燃烧产物，即純粹空气。

本书的主要内容是一个用公制单位、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_2H_6 的、空气系数为 1 的燃烧产物的各种热力性質以及燃料系数为 0, 0.1, 0.2, …… 1.0 等数值的燃烧产物的相对压力表。利用这个表，我們可以很簡單地和有系統地算出各种燃料系数的燃烧产物的热力性質。計算的方法是 和湿蒸汽的热力性質計算方法完全相同的，只是在燃烧产物的計算中用到的一个系数不正好等于燃烧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，本书的第 2 表列出了它在燃料系数为 0, 0.01, 0.02, …… 1.00 时的数值。

接着在本书的第 3 表到第 5 表中，列出了在 35 个温度下，燃料系数为 0, 0.1, 0.2, …… 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, 0.2, …… 1.0 的燃气的分子量和气体常数。

利用了分析得到的燃烧产物的热力性質与燃料系数的关系，作者推导出两个公式。

* 方括弧中数字指第 20 頁上所給的参考文献

使用这两个公式和本书所給各表,可直接算出在燃气輪机和冲压式噴气推进机中的燃烧室中以及在燃气輪机的再热室中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,本书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燃烧产物的方法,在第 7 表中給出了在 18 个温度下需用校正系数的数值,在第四章中用 9 个例题來說明如何应用书中各表和各公式来計算燃烧、再燃烧、以及其他包括各种燃料系数的燃气的热力过程。

在本书各表的制作过程中,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同志和蔣惠娟同志作了詳細的差值分析并且改动了一些数字的最后一位数,使得数值的变化更为平滑。书中各章和第四章中的例题也曾得到清华大学动力机械系燃气輪机教研組蔡容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 月于北京清华園

第 二 版 序 言

虽然根据本书第 1 表中所給空气的焓和燃料系数为 1 的燃气的焓来計算某一燃料系数的燃气的焓是相当简单的,但是有不少同志在应用本表来作燃气輪机設計計算时感到如果本书能够象对 π_0 一样,給出燃料系数为 0.1, 0.2, …… 0.9 的燃气的焓值,可以使得各种燃料系数燃气膨胀的計算更为簡捷。因之,作者乘再版的机会,請中国科学院动力研究室計算組的同志根据方程 (34) 作了这个計算,并把計算結果和原来第 1 表中燃料系数为 0.1, 0.2, …… 0.9 的燃气的 π_0 值一同列为第二版的第 2 表。其余各表沒有更动,第 2 版的第 3 表到第 7 表就是第一版的第 2 表到第 6 表。

吳 仲 华

1959 年 5 月于清华園

目 录

一、制表方法和說明.....	1
1. 热力学基本方程	1
2. 燃气的热力性质与燃料系数的关系	2
3. 第 1 表說明	5
4. 第 2 表說明	5
5. 第 3 表說明	6
6. 第 4 表說明	6
7. 第 5 表說明	6
8. 第 6 表說明	6
9. 第 7 表說明	6
二、在燃烧室和后燃室中产生给定温度的燃气所需的燃料与空气比例.....	7
三、非 C_8H_{10} 燃料的燃气的热力性质.....	9
四、例 題.....	10
第 1 表 空气与燃料系数为 1 的燃气的热力性质表.....	21
第 2 表 各种燃料系数燃气的焓和相对压力.....	52
第 3 表 系数 A 和 B	114
第 4 表 各种燃料系数燃气的定压比热 C_p	115
第 5 表 各种燃料系数燃气的定容比热 C_v	116
第 6 表 各种燃料系数燃气的比热比值 k	117
第 7 表 各种燃料系数燃气的分子量 μ 和气体常数 R	118
第 8 表 四种燃料的校正系数 ξ 和 ζ	118

一、制表方法和說明

1. 热力学基本方程

在一般情况下, 燃料与空气的燃烧产物(以下简称燃气)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), 燃气的内能 u 和焓 i 都只是温度的函数, 所以在表中这些热力性质可以简单地只对应于温度而排列。

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。但是在热力表上, 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如下基本方程

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

对理想气体来说, 因为

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

所以

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

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基准温度 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 和 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:

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

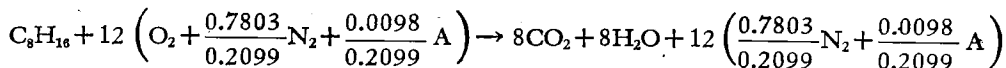
假使我们要知道在非定熵过程中熵的变化, 我们可以用第(5)式来计算它。把第(7)式代入第(5)式后, 可得

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

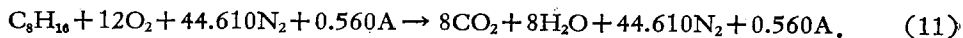
2. 燃气的热力性质与燃料系数的关系

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 $(CH_1)_n$ 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

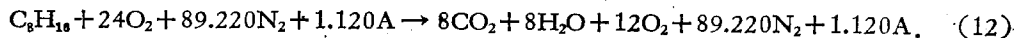


或

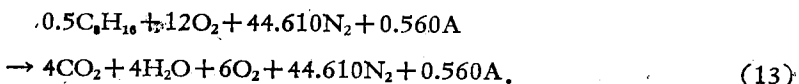


方程(11)表明 1 摩尔 C_8H_{16} 和 57.170 摩尔空气燃烧后产生了 61.170 摩尔的燃气。

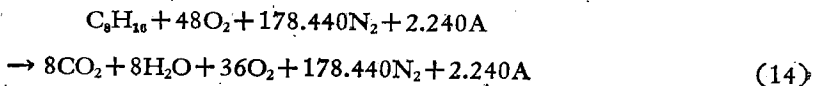
燃料 C_8H_{16} 在两倍理论量的空气中完全燃烧的化学方程是:



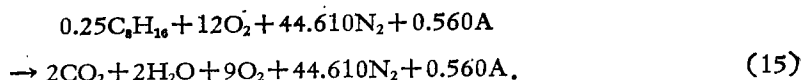
假使我们不說空气系数为 2 而說燃料系数为 0.5, 那末同一的燃烧可以写为



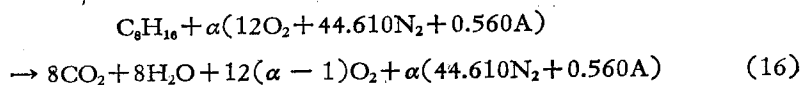
同样地, 空气系数为 4 或燃料系数为 0.25 的燃烧方程为:



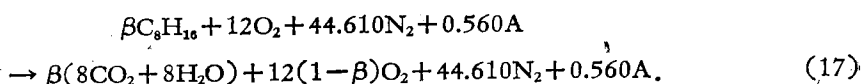
和



由以上各式推出空气系数为 α 或燃料系数为 β 的燃烧方程是:



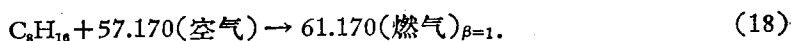
和



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

燃气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,每一种成分的燃气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 值的燃气的热力性质写成为空气的热力性质和任一个选定的 α (或 β) 值的燃气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 的燃气写作(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 β) 模尔(燃气) $_{\beta}$ 可以分别写作

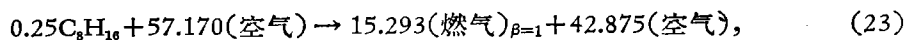
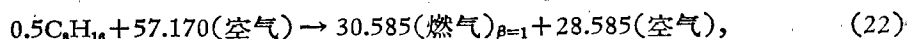
$$59.170(\text{燃气})_{\beta=0.5} = 0.5 \times 61.170(\text{燃气})_{\beta=1} + 0.5 \times 57.170(\text{空气}), \quad (19)$$

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

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

[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



[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)说明燃料与各种比例空气的燃烧产物可以看作是若干(燃气) $_{\beta=1}$ 和若干(空气)之和. 把燃料系数为 β 的 (57.170 + 4 β) 模尔的燃气看作是 61.170 β 模尔的(燃气) $_{\beta=1}$ 和 57.170 (1 - β) 模尔的空气之和以后,我们就可以应用关于混合气体的定律来计算这个燃气的热力性质了. 现在用 A, B 来分别代表在 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 的燃气的热力性质 $C, U, I, S^\circ, \pi^\circ$ 等应各为:

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

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

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

$$S_\beta^\circ = AS_{\beta=0}^\circ + BS_{\beta=1}^\circ, \quad (30)$$

$$\lg \pi_\beta^\circ = \lg e \cdot \frac{S_\beta^\circ}{\mu R} = A \lg \pi_{\beta=0}^\circ + B \lg \pi_{\beta=1}^\circ. \quad (31)$$

上面五个公式还可以写成下列其他两种形式:

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

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

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

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

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

和

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

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

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

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

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

假使我们把燃气的 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, 那末我们看到上面这些公式是和湿蒸汽热力性质的计算公式完全相似的. 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 $(1 - \beta)$ 而已. 式 (25) 和 (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 3 表给出了在 101 个 β 数值 ($\beta = 0, 0.01, \dots, 1$) 下的它们的数值. 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. 同时这两组公式中都只包括了一个系数 (A 或 B) 和一个乘法, 因此在第 1 表中还列出了 $(I_{\beta=1} - I_{\beta=0})$ 和 $(\lg \pi_{\beta=1}^\circ - \lg \pi_{\beta=0}^\circ)$ 的数值. 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和方

便。

用这种方法来计算燃料和各种比例空气产生的燃气的热力性质，不但非常簡單迅速，并且是最容易理解和熟悉的。

3. 第 1 表 說 明

第 1 表列出了温度从 -50°C 到 1500°C ，每隔 1°C ，空气和 (燃气) $_{\beta=1}$ 的 U , I , $\lg \pi^{\circ}$, $(I_{\beta=1} - I_{\beta=0})$, 以及 $(\lg \pi^{\circ}_{\beta=1} - \lg \pi^{\circ}_{\beta=0})$ 。其中，空气的 U , I 和 π° 是直接取自文献 [1] 的 (I 和 S° 的零值取在 0°K)。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 $\lg \pi^{\circ}_{\beta=1}$ 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 $S^{\circ}_{\beta=1}$ ，然后再用 (8) 式来计算 $\lg \pi^{\circ}_{\beta=1}$ 。（表上列出的数目是算出的数目减去 10）。根据文献 [1] 中五位有效数的 S° 计算出来的 $\lg \pi^{\circ}_{\beta=0}$, $\lg \pi^{\circ}_{\beta=1} - \lg \pi^{\circ}_{\beta=0}$, $\lg \pi^{\circ}_{\beta=1}$ 随着温度的变化在第五位数上并不圆滑。计算了它们的第一、第二差值后，看出它们只准确到第四位。因此在表中，这些数字只给到第四位（事实上，原始数据比热也只给到第四位）。

4. 第 2 表 說 明

在实际应用中，知道了燃气的温度来求 I_{β} 或 π°_{β} 是相当简单的，我们只须应用 (34) 式或 (36) 式和第 1 表上给出的 $I_{\beta=0}$ 和 $(I_{\beta=1} - I_{\beta=0})$ 或 $\lg \pi^{\circ}_{\beta=0}$ 和 $(\lg \pi^{\circ}_{\beta=1} - \lg \pi^{\circ}_{\beta=0})$ 就可算出。可是反过来计算时，就是知道了 π°_{β} 来求相对应的温度和 I_{β} 时，我们便得用上述方法试算二、三个温度下的 π°_{β} 才能求出应有的温度和 I_{β} 。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胀至一低压状态），为了使得计算迅速起见，特将在各个温度下， β 为 0.1, 0.2, …, 0.9 的 π° 值和 I 值根据 (36) 式和 (34) 式加以计算，将计算结果列为第 2 表。在用计算尺计算时，假使 β 介乎表列各数时，用最接近 β 的 π° 值或以观察直线插入法来计算就足够准确了。在需要更准确的答案时（用计算机计算时），这样求出的近似答案也可以把计算的次数减少到只是一、二次。

5. 第 3 表 說 明

第 3 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) 和 (26) 两式计算得出的。在一般计算中, 如 β 值介乎表列各数之间, 可以用直线插入法来求 A 或 B 值。如果需要更精确的答数, 可以直接用 (25) 式或 (26) 式来计算。

6. 第 4 表 說 明

第 4 表列出了在 -50°C 到 1500°C 间 35 个温度下, β 为 0, 0.1, 0.2, …… 1.0 的燃气的定压比热。这些数值的计算方法是和 I_{β} 的计算方法完全一样的。从第 4 表我们看出燃气的定压比热随着温度的增高而增大, 增大的数值则随着 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。

7. 第 5 表 說 明

第 5 表列出了和第 4 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。它们是根据第 3 表中的定压比热和下式计算得来的:

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

定容比热的变化情形是和定压比热的变化情形相似的。

8. 第 6 表 說 明

把第 4 表中的 C_p 除以第 5 表中相对应的 C_v 就得到第 5 表中的比热比值 k 。我们从表上看出燃气的比热比值随着温度的增高而减小, 减小的程度则随着 β 的增大而略为增大; 在同一温度下, 燃气的比热比值随着 β 增大而减小。在表中, k 的最大值是 1.401, 最小值是 1.259。

9. 第 7 表 說 明

从 (17) 式我们知道 β 摩尔 C_2H_6 和 57.170 摩尔空气产生了 $(57.170 + 4\beta)$ 摩尔的燃气。因为燃气的质量等于混合物的质量, 即 $(112.21\beta + 1656.2)$ 公斤, 所以燃气的分子量

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

燃气的气体常数

$$R = \frac{847.83}{\mu} = 847.83 \frac{57.170 + 4\beta}{112.21\beta + 1656.2} \frac{\text{公斤-米}}{\text{公斤-度}}. \quad (45)$$

根据上面两式计算得到的 μ 和 R 列于第 7 表中。因为它们随着 β 的变化相当小，所以只计算了 β 自 0 到 1 的十一个 β 下的数值。

二、在燃烧室和后燃室中产生给定温度的燃气所需的燃料与空气比例

固定式燃气轮机的功率、燃气轮式和冲压式喷气推进机的推力都是被它们的结构所能承受的最大温度所限制的。现在我们利用在一、2 节中所得到的燃气的热力性质和燃料系数的简单关系，可以得到简单的公式来直接计算在给定的某个燃气温度条件下所需的燃料系数。

燃 烧 室

在图 1 所示的稳定燃烧过程中，空气自左端进入燃烧室，它的温度是 T_a ，它的焓是 $I_{\beta=0}$ ，它的速度是 V_a 。进入燃烧室燃料的温度是 T_f ，它的焓是 I_f ，它的速度可略去不计。燃气在右端流出燃烧室，它的温度是 T_p ，它的焓是 I_p ，它的速度是 V_p 。燃烧室右端内壁上所受到的温度是燃气的滞止温度或总温度 T_p^* 。

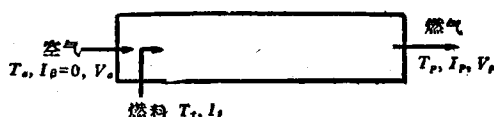


图1 稳定燃烧

将热力学第一定律应用到这种稳定流动的燃烧过程后，我们得到下列方程：

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

式中 N 代表摩尔数， Q 代表燃烧每 1 摩尔燃料时自燃烧室内气体传散到外部的热能，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时的数值。解方程(46)时，我们须利用在某一温度 T' 时（通常为 25°C ）测定的液体燃料变到气体燃烧产物的“燃烧焓差”或“发热量”如下（参阅图 2）。

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

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，可简单地用 $N_f(I_{RP})_{T'}$ 表示之（ $-I_{RP}$ 即为通常所称的“发热量”）。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 摩尔燃料和 57.170 摩尔空气燃烧的热力学第一定律为（参阅公式 24）

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

从上式求得燃烧所需的燃料系数为

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

虽然公式(49)看起来相当长,但是它只包括了几个简单的直接的计算,要比一般的逐步试算再加上查表时的内插或外插简单和迅速得多了。式中 $[(I_f)_{T_f} - (I_f)_{T'}]$ 比其他各项小得多,通常可略去或用 $0.5\mu(T_f - T')$ 来计算。

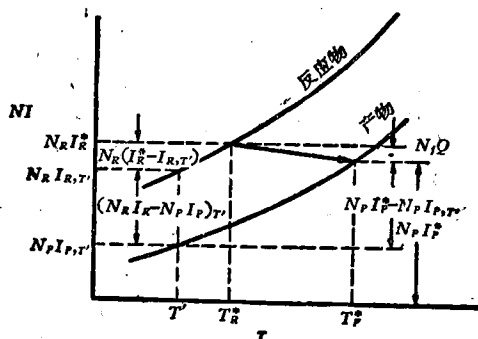


图2 稳定燃烧 $NI-T$ 图

在通常工程上所需的准确要求下, (49) 式是可以用来计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, 乘以该燃料的理论燃料——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, 我们可以用上面的方法为每一种燃料推演出象(49)式那样的一个公式(参阅下章)。

假使要考虑燃烧效率对于所求燃料系数的影响, 我们可以把(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

在燃气轮喷气推进机中的后燃室和燃气轮机装置中的“重热室”中, 反应物是一种燃料系数较低的燃气和新鲜燃料。如果要计算加入新鲜燃料的比例, 使能产生某一给定温度的燃气, 我们必须把(49)式加以修改。为方便起见, 我们考虑 $(57.170 + 4\beta_1)$ 模尔的燃气和 $(\beta_2 - \beta_1)$ 模尔的新鲜燃料进入后燃室或重热室。它们的燃烧方程是

$$\begin{aligned} & (57.170 + 4\beta_1)(\text{燃气})_{\beta_1} + (\beta_2 - \beta_1)\text{C}_4\text{H}_{16} \\ & \rightarrow 57.170(1 - \beta_2)(\text{空气}) + 61.170\beta_2(\text{燃气})_{\beta=1}. \end{aligned} \quad (50)$$

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

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

式中 T_g^* 为进入后燃室或重热室的稀燃气的滞止温度, T_g^* 则为最后浓燃气的滞止温度。将上式移项后可得出

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

上式也可以用来计算在柴油机中的混合气作等压燃烧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 代表残气和新空气在压缩过程完毕时的温度。

三、非 C_8H_{16} 燃料的燃气的热力性质

前面说明的各热力性质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]中曾经举例比较了在各种温度下燃料成分为 $(CH_1)_n$ 、 $(CH_2)_n$ 和 $(CH_3)_n$ ， β 为 0.25 和 0.5 的各种燃气的热力性质。比较结果说明，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，它们温度的差别不到 0.5°C ，焓的差别不到 0.05%。当 β 为 0.5 时，它们的温度差别不到 1°C ，焓的差别不到 0.1%。因此在通常情况下，根据 C_8H_{16} 制成的热力性质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，并且用摩尔作单位）。

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。

假使我们在某一个温度下的任意燃料与理论量空气（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

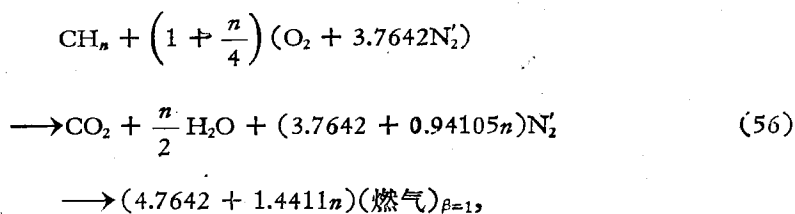
$$I_\beta = I_{\beta=0} + B(I_{\beta=1} - I_{\beta=0}) = I_{\beta=0} + B\xi(I_{\beta=1} - I_{\beta=0})_{C_8H_{16}}, \quad (54)$$

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

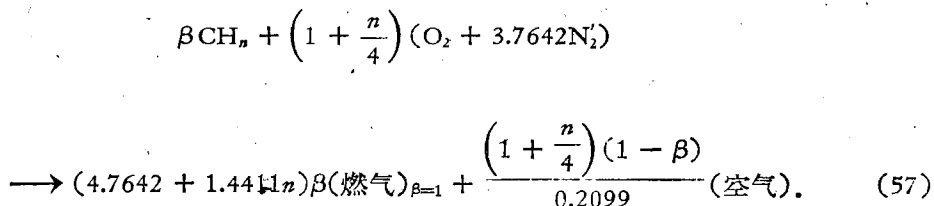
(54)、(55)两式是和(34)、(36)两式很相似的，只是多了一个系数 ξ 或 ζ 。这两个系数都是温度的函数，但是它们随着温度的变化是比较小的。因此我们只需算出一些间隔相当大的温度下的数值后，把它们列成一表就足够应用了。

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、地下气化煤气、重油和萨拉多夫天然煤气的 I 和 $\lg \pi^\circ$ 值，我们就可以算出列在第 8 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 值和 ζ 值随着温度的变化是很小的。

(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。它们与理论量空气的燃烧方程是



燃料系数为 β 的燃烧方程是



因此,

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

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

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

从文献 [1] 所给的重油和薩拉多夫天然煤气与理論量空气所产生的燃气的組成气体的比例得出这些燃料的 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 个例題是用來說明如何应用书中所給的几个热力性質表和一些公式来計算燃烧、再燃烧以及其他各种包括燃料与各种比例空气的燃烧产物的热力过程。这些例題包括了固定式燃气輪机, 燃气輪噴气推进机, 冲压式噴气推进机, 以及后燃室的計算等。

[例題 1] 稳定流动的燃烧 稳定地流进一燃烧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 , 燃料的燃烧焓差为 $-10,643$ 千卡/公斤。假使燃烧是絕热的, 并且流出燃烧室的燃气的滯止温度为 800°C , 燃料与空气的比例应该是多少?

[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,

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

所以燃料与空气的比例应为

$$0.2342 \times \frac{112.2}{28.97 \times 57.17} = 0.2342 \times 0.06775 = 0.01587.$$

【例题 2】燃气的膨胀(1) C_3H_8 与 5 倍理论量空气的燃烧产物在稳定流动情形下自 t_1 为 600°C, p_1 为 5 个大气压, 经过一燃气轮后膨胀至 p_2 为 1 个大气压。燃气轮的效率(以定熵膨胀功为标准的)为 90%。求每千克燃气所作的功。

【解】空气系数为 5 相当于燃料系数 β 为 0.20。从第 2 表查出

$$I_1 = 6333.9 \text{ 千卡/摩尔,}$$

$$\pi_1^\circ = 70.88.$$

定熵膨胀至一个大气压后

$$\pi_{2s}^\circ = 70.88/5 = 14.18.$$

用此值在第 2 表上查出(用直线插入法)

$$t_{2s} = 300.2^\circ\text{C},$$

$$I_{2s} = 4047.9 + 0.2 \times 7.4 = 4049.4 \text{ 千卡/摩尔,}$$

所以膨胀功为

$$0.9(6333.9 - 4049.4) = 2056.1 \text{ 千卡/摩尔.}$$

从第 7 表中查出 β 为 0.20 的燃气的分子量为 28.957, 所以燃气所作的功亦为

$$\frac{2056.1}{28.957} = 71.01 \text{ 千卡/公斤.}$$

【例题 3】燃气的膨胀(2) C_3H_8 与 3 倍理论量空气的燃烧产物在稳定流动情形下自 t_1 为 800°C, p_1 为 6 个大气压, 经过一燃气轮后膨胀至 p_2 为 1 个大气压。燃气轮的效率(以定熵膨胀作标准的)为 85%。求每公斤燃气所作的功。

【解】(1) 精确解法: 用公式(36)和用计算机作计算。

将 β 为 1/3 代入(26)式得

$$B = 0.34853.$$

在 800°C 时,

$$I_1 = 7817.9 + 0.34853 \times 576.8 = 8018.9 \text{ 千卡/摩尔},$$

$$\lg \pi_1^\circ = 2.1796 + 0.34853 \times 0.1550 = 2.2336.$$

定熵膨胀后,

$$\lg \pi_2^\circ = \lg \pi_1^\circ - \lg 6 = 2.2336 - 0.7782 = 1.4554.$$

从第 1 表和公式(36)算出:

在 413°C 时,

$$\lg \pi^\circ = 1.4271 + 0.34853 \times 0.0806 = 1.4552;$$

在 414°C 时,

$$\lg \pi^\circ = 1.4295 + 0.34853 \times 0.0808 = 1.4577.$$

用直线插入法求得

$$t_2 = 413.08^\circ\text{C}.$$

在这个温度下,

$$I_2 = 4832.7 + 0.34853 \times 275.8 = 4928.8 \text{ 千卡/摩尔},$$

所以

$$I_1 - I_2 = 0.85(8018.9 - 4928.8) = 2626.6 \text{ 千卡/摩尔}.$$

从第 7 表查出 $\mu = 28.949$, 所以每公斤燃气所作的功为

$$\frac{2626.6}{28.949} = 90.73 \text{ 千卡/公斤}.$$

(2) 近似解法一: 在第 2 表上用直线插入法和用计算尺计算 I, π° 和 t .

从第 2 表上查出在 800°C 时,

$$I_1 = 7999.2 + 58.8 \div 3 = 8019 \text{ 千卡/摩尔},$$

$$\pi_1^\circ = 169.2 + 6.2 \div 3 = 171.3.$$

定熵膨胀后,

$$\pi_2^\circ = \frac{171.3}{6} = 28.55.$$

从第 2 表上查出:

$$\text{在 } 413^\circ\text{C 时}, \quad \pi^\circ = 28.34 + \frac{0.54}{3} = 28.52;$$

$$\text{在 } 414^\circ\text{C 时}, \quad \pi^\circ = 28.50 + \frac{0.55}{3} = 28.68.$$

因此

$$t_2 = 413.2^\circ\text{C},$$

$$I_2 = 4921.3 + 28.5 \div 3 = 4930 \text{ 千卡/摩尔},$$

$$I_1 - I_2 = 0.85(8019 - 4930) = 2626 \text{ 千卡/摩尔},$$