

烃类燃料的 燃气热力性质表

严家驷 杨玉顺 刘 明 著

科学出版社

750974

TK12-64/01

烃类燃料的燃气热力性质表

严家驷 杨玉顺 刘 明 著

HK38/14



C0395700

科学出版社

1989

内 容 简 介

本书根据著者近年的研究成果和最新资料编写而成。内容包括：

一、制表的热力学基础——各种热力学关系式、计算公式和方法,以及制表原理。

二、采用的基本数据和计算式——各种标准值、常数、系数和具体的计算式。

三、应用举例,包括如何查表及如何利用各表进行热力计算。

四、热力性质表,包括焓、对数相对压力、定压摩尔热容等六种表格,参数范围为:

$$T=200\sim 1800\text{K}; \quad P=0\sim 100\text{bar}$$

利用本书中的表可对空气及任何烃类燃料生成的燃气在上述参数范围内进行精确(考虑压力影响)的热力计算。

本书可供从事压气机、燃气轮机、喷气发动机的设计与研究人员、高等院校教师和学生以及有关专业的科技人员使用。

烃类燃料的燃气热力性质表

严家骏 杨玉顺 刘 明 著

责任编辑 李雪芹 陈文芳

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100707

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1989年12月第一版 开本: 787×1092 1/16

1989年12月第一次印刷 印张: 25 1/4

平 1—270

印数: 精 1—340

插页: 精 2

字数: 588,000

ISBN 7-03-000610-0/TB·18(平)

ISBN 7-03-000618-6/TB·19(精)

定 价: 平 装 28.00 元

布 装 30.20 元

前 言

燃气的热力性质数据是设计计算燃气轮机和喷气发动机以及对它们的性能进行测试分析所必需的基本资料。吴仲华教授著《燃气的热力性质表》^[1]提供了详尽的 CH_4 燃气热力性质数据,得到了广泛的应用。当时制表的前提是将燃气看作理想气体,因此内能、焓、比热以及定熵过程中的相对压力都只是温度的单值函数。利用该表进行低压燃气的热力过程的计算是很方便的。本书中的表将进一步考虑压力及不同氢碳比对燃气性质的影响,它是吴氏燃气热力性质表的继续和发展。

由于压气机和燃气轮机技术和材料工艺的发展,燃气的温度和压力不断提高。因此,如不考虑压力对燃气热力性质的影响而仍将燃气看作理想气体将会造成明显的误差。事实上,即使在大气压力下,燃气的热力性质就已经显示出与理想气体有差别了。例如,当 $T = 290\text{K}$, $P = 1\text{bar}$ 时, CH_4 纯燃气的摩尔容积、焓、对数相对压力和定压摩尔热容为:

$$\begin{aligned} V &= 24.099\text{m}^3/\text{kmol} & H &= 8647.4\text{kJ}/\text{kmol} \\ \ln \pi &= 1.6953 & C_p &= 30.675\text{kJ}/(\text{kmol} \cdot \text{K}) \end{aligned}$$

如果按理想气体考虑,它们的值则为:

$$\begin{aligned} V^0 &= 24.112\text{m}^3/\text{kmol} & H^0 &= 8653.7\text{kJ}/\text{kmol} \\ \ln \pi^0 &= 1.6974 & C_p^0 &= 30.633\text{kJ}/(\text{kmol} \cdot \text{K}) \end{aligned}$$

可见,即使在较低的压力下,如能考虑压力对燃气热力性质的影响,无疑将提高计算精度。

燃气成分随燃料品种和燃料系数的不同而变化。如果象处理一般实际气体那样,按温度和压力两个独立参数(事实上是四个独立参数,即还有燃料的氢碳比 n 和燃料系数 β)来编制燃气热力性质表,那么对每一种燃料,相应每一个压力值,就需要一个单独的类似文献[1]那样的表。这样就不胜其繁了。

考虑到燃气应用的特定条件是对比压力(P_r)较低,而对比温度(T_r)较高,作者利用这一特定条件下有关各热力学余函数随压力的线性变化关系,提出了压力对燃气热力性质影响的余函数线性修正方法^[2]。同时,对不同氢碳比的烃类燃料,提出利用 CH_4 燃气和碳燃气的热力性质插值计算任意氢碳比燃料 CH_n 燃气的热力性质^[3]。在这些想法的基础上,根据最新资料提供的基本数据编制了国际单位制(SI)的燃气热力性质和修正系数表,其参数范围为:

$$T = 200 \sim 1800\text{K} \quad P = 0 \sim 100\text{bar}$$

利用这些表可以得到任意氢碳比烃类燃料[从纯碳($n = 0$)到纯氢($n = \infty$)],任意燃料系数[从纯空气($\beta = 0$)到纯燃气($\beta = 1$)],不同温度、不同压力的非离解态燃气热力性质。从而在表的总容量增加不多的基础上大大扩展了表的应用范围并提高了热力计算的精确度(考虑了压力影响)。

编制本表所依据的文献[2—4]承蒙中国科学院工程热物理研究所吴仲华教授(研

究员)、蔡睿贤研究员、张世铮副研究员、朱明善教授审阅,谨表深切的谢意。对工程热物理研究所帅应熙同志所给予的支持和协助亦表衷心的感谢。

竭诚欢迎读者指出本书的错误和不足之处,以便再版时改进。

严家驷
于哈尔滨工业大学
1987年2月

符 号 表

A ——燃气中空气的摩尔分数	β ——燃料系数
a ——音速	γ ——比热比
B ——燃气中纯燃气的摩尔分数	ΔX ——(任一)余函数
C ——摩尔热容	η_B ——燃烧室效率
c ——比热	π ——相对压力
F ——摩尔自由能(亥姆霍兹函数)	φ ——速度系数
G ——摩尔自由焓(吉布斯函数)	上角标:
H ——摩尔焓	0——理想气体
I ——燃气中 CH_4 燃气的摩尔分数	*——滞止(参数)
J ——燃气中碳燃气的摩尔分数	下角标:
k ——定熵指数	a ——空气
M ——分子量、平均分子量	c ——临界
n ——燃料的氢碳原子数之比	f ——燃料
P ——压力	g ——燃气
Q_L ——燃料低热值	i ——对 CH_4 燃气而言
R ——气体常数	j ——对碳燃气而言
R_M ——通用气体常数	n ——氢碳比为 n 时
S ——摩尔熵	P ——定压
T ——绝对温度	r ——对比
U ——摩尔内能	S ——定熵
V ——摩尔容积	T ——定温
v ——比容、流速	V ——定容
X ——(任一)函数	
x ——空气的氮氧摩尔比	
Z ——压缩因子	

目 录

前言	i
符号表	iv
一、制表的热力学基础	1
1. 理想气体性质	1
2. 热力学余函数	2
3. 简化的状态方程	3
4. 各余函数的导出	4
5. 任意氢碳比烃类燃料燃气热力性质的插值方法	5
6. 燃烧室和后燃室中燃料系数的计算方法	9
二、采用的基本数据和计算式	13
三、应用举例	16
1. 查表及计算练习	16
2. 绝热膨胀和压缩过程	19
3. 换热和燃烧过程	25
四、热力性质表	29
表 1 焓及其压力修正系数 ($H^0, \Delta H'$)	29
表 2 对数相对压力及其压力修正系数 ($\ln \pi^0, \Delta \ln \pi'$)	191
表 3 定压摩尔热容及其压力修正系数 ($C_p^0, \Delta C_p'$)	353
表 4 压容乘积及余摩尔容积 ($PV^0, \Delta V$)	371
表 5 平均分子量、气体常数、 CH_4 燃气和碳燃气的摩尔分数 (M, R, I 和 J)	387
表 6 CH_4 燃气中空气和纯燃气的摩尔分数 (A_i 和 B_i)	395
参考文献	397

一、制表的热力学基础

1. 理想气体性质

任何气态物质(包括各种单一气体和混合气体),在低密度下都比较接近理想气体.理想气体的状态方程为:

$$Pv^0 = RT \quad (1)$$

或

$$PV^0 = MRT = R_M T \quad (2)$$

理想气体分子间无作用力,其内能只是温度的函数,而与压力或容积无关:

$$U^0 = U^0(T) \quad (3)$$

由式(2)和式(3)可知,理想气体的焓也只是温度的函数:

$$H^0 = U^0 + PV^0 = U^0(T) + R_M T = H^0(T) \quad (4)$$

因此,理想气体的定容摩尔热容和定压摩尔热容也都只是温度的函数:

$$C_v^0 = \left(\frac{\partial U^0}{\partial T} \right)_v = \frac{dU^0}{dT} = C_v^0(T) \quad (5)$$

$$C_p^0 = \left(\frac{\partial H^0}{\partial T} \right)_p = \frac{dH^0}{dT} = C_p^0(T) \quad (6)$$

理想气体定压摩尔热容与定容摩尔热容的差值(迈耶公式)为:

$$C_p^0 - C_v^0 = R_M \quad (7)$$

理想气体的熵与温度和压力(或容积)都有关:

$$S^0 = \int \frac{C_p^0 dT}{T} - R_M \ln P + C \quad (8)$$

在过程 1→2 中,熵的变化则为:

$$S_2^0 - S_1^0 = \int_{T_1}^{T_2} \frac{C_p^0 dT}{T} - R_M \ln \frac{P_2}{P_1} \quad (9)$$

气体在叶轮机或是在喷管、扩压管中膨胀、压缩时所进行的过程可以认为是绝热过程.如果不考虑不可逆损失,则同时又是定熵过程.对定熵的膨胀或压缩过程

$$S_2^0 - S_1^0 = 0$$

因而从式(9)可得:

$$\ln \frac{P_2}{P_1} = \frac{1}{R_M} \int_{T_1}^{T_2} \frac{C_p^0 dT}{T} \quad (10)$$

令

$$\ln \pi^0 = \frac{1}{R_M} \int_{T_0}^T \frac{C_p^0 dT}{T} + C \quad (11)$$

式中 C 为任意指定的常数; T_0 为任意指定的基点温度.

$$\ln \frac{\pi_2^0}{\pi_1^0} = \ln \pi_2^0 - \ln \pi_1^0 = \frac{1}{R_M} \int_{T_1}^{T_2} \frac{C_p^0 dT}{T}$$

$$= \ln \frac{P_2}{P_1} = \ln P_2 - \ln P_1$$

即

$$\frac{\pi_2^0}{\pi_1^0} = \frac{P_2}{P_1} \quad (12)$$

或

$$\ln \pi_2^0 - \ln \pi_1^0 = \ln P_2 - \ln P_1 \quad (13)$$

π^0 称为理想气体的相对压力。由式 (12) 可知, 在定熵过程中, 理想气体的相对压力之比等于压力之比。

$\ln \pi^0$ 称为理想气体的对数相对压力。由式 (11) 可知, 理想气体的对数相对压力是一种只和温度有关的热力学函数, 它实质上是温度对熵的贡献。

2. 热力学余函数

实际气体和理想气体各种性质上的差别可以通过相应的余函数表示出来。例如:

$$H(T, P) = H^0(T) + \Delta H(T, P) \quad (14)$$

$$C_p(T, P) = C_p^0(T) + \Delta C_p(T, P) \quad (15)$$

$$S(T, P) = S^0(T, P) + \Delta S(T, P) \quad (16)$$

$$\ln \pi(T, P) = \ln \pi^0(T) + \Delta \ln \pi(T, P) \quad (17)$$

式中 ΔH , ΔC_p , ΔS 和 $\Delta \ln \pi$ 为余焓、余定压摩尔热容、余熵和余对数相对压力。这些余函数均可通过相应函数的热力学微分方程结合实际气体状态方程从极低压力 ($P \rightarrow 0$) 沿定温线积分得出^[4]。例如:

$$\Delta H(T, P) = \int_{P_0}^P \left[V - T \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_P \right] dP_T \quad (18)$$

$$\Delta C_p(T, P) = -T \int_{P_0}^P \left(\frac{\partial^2 V}{\partial T^2} \right)_P dP_T \quad (19)$$

$$\Delta S(T, P) = - \int_{P_0}^P \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_P dP_T + R_M \ln \frac{P}{P_0} \quad (20)$$

关于余对数相对压力 ($\Delta \ln \pi$) 有必要作如下的推导和说明:

实际气体的熵

$$S = S^0 + \Delta S$$

$$S_2 - S_1 = (S_2^0 - S_1^0) + (\Delta S_2 - \Delta S_1)$$

$$= \left(\int_{T_1}^{T_2} \frac{C_p^0 dT}{T} - R_M \ln \frac{P_2}{P_1} \right) + (\Delta S_2 - \Delta S_1)$$

对定熵过程 ($S_2 = S_1$) 可得:

$$\begin{aligned} R_M \ln \frac{P_2}{P_1} &= \int_{T_1}^{T_2} \frac{C_p^0 dT}{T} + (\Delta S_2 - \Delta S_1) \\ &= \left(\int_{T_0}^{T_2} \frac{C_p^0 dT}{T} + C + \Delta S_2 \right) - \left(\int_{T_0}^{T_1} \frac{C_p^0 dT}{T} + C + \Delta S_1 \right) \end{aligned}$$

$$\text{即} \quad \ln \frac{P_2}{P_1} = \frac{1}{R_M} \left[\left(\int_{T_0}^{T_2} \frac{C_p^0 dT}{T} + C + \Delta S_2 \right) - \left(\int_{T_0}^{T_1} \frac{C_p^0 dT}{T} + C + \Delta S_1 \right) \right]$$

令

$$\frac{1}{R_M} \left(\int_{T_0}^T \frac{C_p^0 dT}{T} + C + \Delta S \right) = \ln \pi \quad (21)$$

则得:

$$\ln \frac{P_2}{P_1} = \ln \pi_2 - \ln \pi_1 = \ln \frac{\pi_2}{\pi_1}$$

或

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{\pi_2}{\pi_1} \quad (22)$$

所以,对实际气体,如同对理想气体一样,定熵过程中的压力之比等于相对压力之比。如式(21)所示,对实际气体,对数相对压力中应包含余熵项:

$$\ln \pi = \frac{1}{R_M} \left(\int_{T_0}^T \frac{C_p^0 dT}{T} + C \right) + \frac{\Delta S}{R_M}$$

即

$$\ln \pi = \ln \pi^0 + \Delta \ln \pi \quad (23)$$

所以,余对数相对压力 ($\Delta \ln \pi$) 实质上就是对比余熵(即余熵与气体常数之比)。

3. 简化的状态方程

解决余函数问题的关键在于找出燃气作为实际气体的状态方程。有了状态方程,就能根据热力学关系式得出各个余函数,然后便可在理想气体性质的基础上进行修正。

由通用压缩因子图(图1)知,当对比压力 $P_r = P/P_c < 2$, $T_r = T/T_c > 1.5$ 时(大约相当于燃气压力 $P < 100\text{bar}$, 温度 $T > 250\text{K}$, 正是燃气通常所处的状态),定温线均近似为直线段。这些线段全部通过纵轴上 $Z = PV/R_M T = 1$ 的点。即

$$\left(\frac{\partial Z}{\partial P_r} \right)_{T_r} = \varphi(T_r)$$

$$Z = \varphi(T_r) P_r + C$$

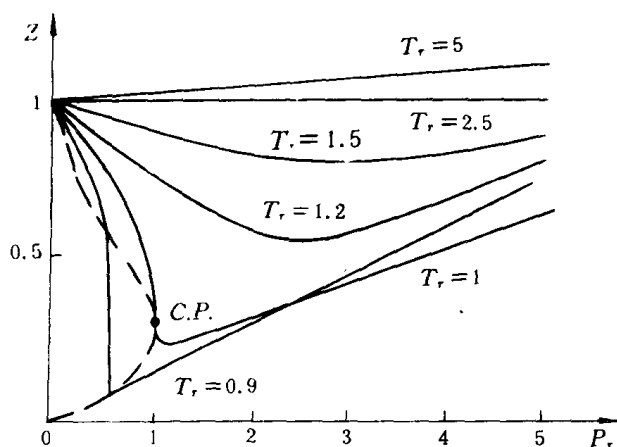


图 1

当 $P_r \rightarrow 0$ 时, $Z = 1$. 所以 $C = 1$. 即

$$Z = \varphi(T_r)P_r + 1 \quad (24)$$

这就是适用于空气和燃气的对比状态方程(当 $P_r < 2$, $T_r > 1.5$) 它具有比较简单的形式.

4. 各余函数的导出

以温度和压力为独立变量时,先求出余自由焓(余吉布斯函数),然后再求其它余函数就非常方便了.

$$\begin{aligned} \Delta G_r &= \frac{\Delta G}{P_c V_c} = \int_0^{P_r} (V_r - V_r^0) dP_{r,T} = \int_0^{P_r} \left(\frac{T_r Z}{Z_c P_r} - \frac{T_r}{Z_c P_r} \right) dP_{r,T} \\ &= \int_0^{P_r} \left\{ \frac{T_r [\varphi(T_r)P_r + 1]}{Z_c P_r} - \frac{T_r}{Z_c P_r} \right\} dP_{r,T} \\ &= \int_0^{P_r} \frac{T_r \varphi(T_r)}{Z_c} dP_{r,T} = \frac{1}{Z_c} T_r \varphi(T_r) P_r \end{aligned}$$

$$\text{令} \quad T_r \varphi(T_r) = f(T_r) \quad (25)$$

$$\text{则} \quad \Delta G_r = \frac{1}{Z_c} f(T_r) P_r \quad (26)$$

根据对比余函数之间的关系式可得^[4]:

$$\Delta V_r = \frac{\Delta V}{V_c} = \left(\frac{\partial \Delta G_r}{\partial P_r} \right)_{T_r} = \frac{1}{Z_c} f(T_r) \quad (27)$$

$$\Delta S_r = \frac{\Delta S}{R_M Z_c} = - \left(\frac{\partial \Delta G_r}{\partial T_r} \right)_{P_r} = - \frac{1}{Z_c} f'(T_r) P_r \quad (28)$$

$$\Delta \ln \pi = \frac{\Delta S}{R_M} = \frac{\Delta S_r R_M Z_c}{R_M} = - f'(T_r) P_r \quad (29)$$

$$\Delta H_r = \frac{\Delta H}{P_c V_c} = \Delta G_r + T_r \Delta S_r = \frac{1}{Z_c} [f(T_r) - T_r f'(T_r)] P_r \quad (30)$$

$$\Delta U_r = \frac{\Delta U}{P_c V_c} = \Delta H_r - P_r \Delta V_r = - \frac{1}{Z_c} T_r f'(T_r) P_r \quad (31)$$

$$\Delta F_r = \frac{\Delta F}{P_c V_c} = \Delta G_r - P_r \Delta V_r = \Delta U_r - T_r \Delta S_r = 0 \quad (32)$$

$$\Delta C_{P_r} = \frac{\Delta C_p}{R_M Z_c} = \left(\frac{\partial \Delta H_r}{\partial T_r} \right)_{P_r} = - \frac{1}{Z_c} T_r f''(T_r) P_r \quad (33)$$

$$\Delta C_{V_r} = \frac{\Delta C_v}{R_M Z_c} = \left(\frac{\partial \Delta U_r}{\partial T_r} \right)_{P_r} = - \frac{1}{Z_c} [2f'(T_r) + T_r f''(T_r)] P_r - \frac{1}{Z_c} [f'(T_r)]^2 P_r^2 \quad (34)$$

以上各余函数[式(26)–(34)],除 ΔV_r 与压力无关, $\Delta F_r = 0$ 以及 ΔC_{V_r} 为对比压力的二次式外,其它各个余函数均为压力的一次式,在定温下与压力成正比,比例系数(即压力修正系数)等于这些余函数在定温下对压力的一阶偏导数. 例如:

$$\Delta H' = \left(\frac{\partial \Delta H_r}{\partial P} \right)_{T_r} = \left(\frac{\partial \Delta H_r}{\partial P_r} \right)_{T_r} \cdot \frac{P_c V_c}{P_c} = \frac{1}{Z_c} [f(T_r) - T_r f'(T_r)] V_c$$

$$= \frac{R_M T_c}{P_c} [f(T_r) - T_r f'(T_r)] \quad (35)$$

$$\Delta \ln \pi' = \left(\frac{\partial \Delta \ln \pi}{\partial P} \right)_T = \frac{-1}{P_c} f'(T_r) \quad (36)$$

$$\begin{aligned} \Delta C'_p &= \left(\frac{\partial \Delta C_p}{\partial P} \right)_T = \left(\frac{\partial \Delta C_{pr}}{\partial P_r} \right)_{T_r} \cdot \frac{R_M Z_c}{P_c} = \frac{-1}{Z_c} T_r f''(T_r) \frac{R_M Z_c}{P_c} \\ &= -\frac{R_M}{P_c} T_r f''(T_r) \end{aligned} \quad (37)$$

所以

$$H = H^0 + \Delta H' \cdot P \quad (38)$$

$$\ln \pi = \ln \pi^0 + \Delta \ln \pi' \cdot P \quad (39)$$

$$C_p = C_p^0 + \Delta C'_p \cdot P \quad (40)$$

余摩尔容积与压力无关:

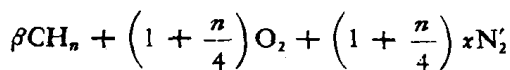
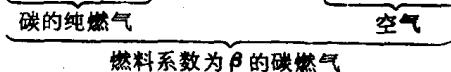
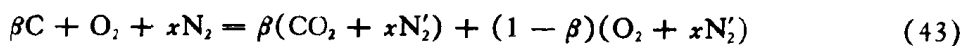
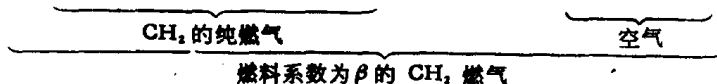
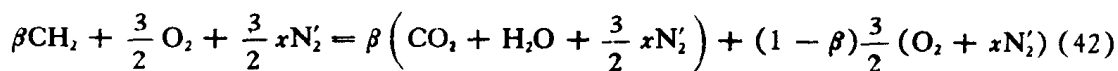
$$V = V^0 + \Delta V = \frac{R_M T}{P} + \frac{V_c f(T_r)}{Z_c} = \frac{R_M T}{P} + \frac{R_M T_c}{P_c} f(T_r) \quad (41)$$

5. 任意氢碳比烃类燃料燃气热力性质的插值方法

各种烃类燃料的氢碳比可能很不相同,然而它们的燃烧产物的组分并不复杂。如果认为燃烧是完全的,那么它们的燃烧产物中只包含 CO_2 , H_2O , O_2 , N_2' (N_2' 表示大气氮,它是大气中除氧以外的其它气体的总称),差别仅在于这些组分的相对含量不同而已。可将不同氢碳比燃料生成的燃气看作任意指定的两种参考燃料生成的燃气按不同比例形成的混合物^[1]。因此,只需给出两种不同氢碳比燃料的燃气性质,其它各种氢碳比燃料的燃气性质可根据这两种燃气的已知性质用插值(包括内插和外插)法方便地计算出来。

考虑到目前通用的吴氏燃气热力性质表^[1]是针对氢碳比为2的烃燃料编制的,而 $n=2$ 也比较接近常用烃燃料的氢碳比,又考虑到碳燃料 ($n=0$) 生成的燃气中不包含水蒸气,具有最简单的关系式,因此,本书选择 CH_4 和碳为参考燃料,给出它们的热力性质,作为插值计算其它各种烃类燃料燃气性质的依据。

设大气中氮氧摩尔成分之比为 x (这里的氮系指大气氮, $x=3.77382$),燃料中氢碳原子数之比为 n 。当燃料系数为 β 时, CH_4 , C , CH_n 在空气中完全燃烧的反应方程式分别为:



$$\begin{aligned}
&= \beta \left[\text{CO}_2 + \frac{n}{2} \text{H}_2\text{O} + \left(1 + \frac{n}{4}\right) x \text{N}'_2 \right] + (1 - \beta) \left(1 + \frac{n}{4}\right) (\text{O}_2 + x \text{N}'_2) \\
&\quad \text{燃料系数为 } \beta \text{ 的 } \text{CH}_n \text{ 燃气} \\
&= \frac{n}{2} \left[\beta \left(\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} + \frac{3}{2} x \text{N}'_2 \right) + (1 - \beta) \frac{3}{2} (\text{O}_2 + x \text{N}'_2) \right] \\
&\quad \text{燃料系数为 } \beta \text{ 的 } \text{CH}_4 \text{ 燃气} \\
&\quad + \left(1 - \frac{n}{2}\right) \left[\beta (\text{CO}_2 + x \text{N}'_2) + (1 - \beta) (\text{O}_2 + x \text{N}'_2) \right] \\
&\quad \text{燃料系数为 } \beta \text{ 的碳燃气}
\end{aligned} \tag{44}$$

式(44)表明: 每 1 kmol CH_n 生成的燃料系数为 β 的燃气, 相当于 $\frac{n}{2}$ kmol CH_4 生成的

燃料系数为 β 的燃气加上 $\left(1 - \frac{n}{2}\right)$ kmol 碳生成的燃料系数为 β 的燃气。

根据式(42), (43), (44) 可知, β kmol CH_4 , C 和 CH_n 生成的燃料系数为 β 的燃气的 kmol 数依次为:

$$\beta \left(2 + \frac{3}{2} x\right) + (1 - \beta) \frac{3}{2} (1 + x) = \frac{1}{2} \beta + \frac{3}{2} (1 + x) \text{ kmol} \tag{45}$$

$$\beta(1 + x) + (1 - \beta)(1 + x) = 1 + x \text{ kmol} \tag{46}$$

$$\begin{aligned}
&\beta \left[\left(1 + \frac{n}{2}\right) + \left(1 + \frac{n}{4}\right) x \right] + (1 - \beta) \left(1 + \frac{n}{4}\right) (1 + x) \\
&= \frac{n}{4} \beta + \left(1 + \frac{n}{4}\right) (1 + x) \text{ kmol}
\end{aligned} \tag{47}$$

令 $X_{i,\beta}$, $X_{j,\beta}$ 和 $X_{n,\beta}$ 分别表示 CH_4 , C 和 CH_n 生成的燃料系数为 β 的每 kmol 燃气的热力性质, 那么根据式(44)可得:

$$\begin{aligned}
&\left[\frac{n}{4} \beta + \left(1 + \frac{n}{4}\right) (1 + x) \right] X_{n,\beta} = \frac{n}{2} \left[\frac{1}{2} \beta + \frac{3}{2} (1 + x) \right] X_{i,\beta} \\
&\quad + \left(1 - \frac{n}{2}\right) (1 + x) X_{j,\beta}
\end{aligned}$$

从而得:

$$X_{n,\beta} = \frac{n[\beta + 3(1 + x)]}{n\beta + (4 + n)(1 + x)} X_{i,\beta} + \frac{(4 - 2n)(1 + x)}{n\beta + (4 + n)(1 + x)} X_{j,\beta}$$

令

$$I = \frac{n[\beta + 3(1 + x)]}{n\beta + (4 + n)(1 + x)} = \frac{(14.32146 + \beta)n}{19.09528 + (4.77382 + \beta)n} \tag{48}$$

$$J = \frac{(4 - 2n)(1 + x)}{n\beta + (4 + n)(1 + x)} = \frac{19.09528 - 9.54764n}{19.09528 + (4.77382 + \beta)n} \tag{49}$$

则

$$X_{n,\beta} = I X_{i,\beta} + J X_{j,\beta} \tag{50}$$

$$I + J = 1 \tag{51}$$

式(50)即为利用 CH_4 和 C 的燃气性质 ($X_{i,\beta}$ 和 $X_{j,\beta}$) 计算任意氢碳比燃料的燃气性质

($X_{n,\beta}$) 的插值公式。式中 I 和 J 分别表示 CH_n 燃气中 CH_2 燃气和碳燃气的摩尔分数。不同 n 和 β 时的 I 值和 J 值可根据式 (48), (49) 计算, 亦可从表 5 中直接查得。 I 值可以大于 1 (当 $n > 2$ 时), 这时 J 为负值, 二者之和仍为 1。

考虑压力修正:

$$X_{i,\beta} = X_{i,\beta}^0 + \Delta X'_{i,\beta} \cdot P \quad (52)$$

$$X_{j,\beta} = X_{j,\beta}^0 + \Delta X'_{j,\beta} \cdot P \quad (53)$$

将此二式代入式 (50):

$$X_{n,\beta} = I(X_{i,\beta}^0 + \Delta X'_{i,\beta} \cdot P) + J(X_{j,\beta}^0 + \Delta X'_{j,\beta} \cdot P) \quad (54)$$

式 (54) 中的 $X_{i,\beta}^0$, $\Delta X'_{i,\beta}$ 和 $X_{j,\beta}^0$, $\Delta X'_{j,\beta}$ 可由 CH_2 和碳的纯燃气 ($\beta = 1$) 及空气 ($\beta = 0$) 的热力性质根据不同 β 值内插计算如下:

$$\left. \begin{aligned} X_{i,\beta}^0 &= A_i X_{\beta=0}^0 + B_i X_{i,\beta=1}^0 \\ \Delta X'_{i,\beta} &= A_i \Delta X'_{\beta=0} + B_i \Delta X'_{i,\beta=1} \end{aligned} \right\} \quad (55)$$

$$\left. \begin{aligned} X_{j,\beta}^0 &= A_j X_{\beta=0}^0 + B_j X_{j,\beta=1}^0 \\ \Delta X'_{j,\beta} &= A_j \Delta X'_{\beta=0} + B_j \Delta X'_{j,\beta=1} \end{aligned} \right\} \quad (56)$$

根据式 (42) 和式 (45) 可知:

$$\left. \begin{aligned} A_i &= \frac{(1-\beta) + \frac{3}{2}(1+x)}{\frac{1}{2}\beta + \frac{3}{2}(1+x)} = \frac{14.32146(1-\beta)}{14.32146 + \beta} \\ B_i &= \frac{\beta\left(2 + \frac{3}{2}x\right)}{\frac{1}{2}\beta + \frac{3}{2}(1+x)} = \frac{15.32146\beta}{14.32146 + \beta} \end{aligned} \right\} \quad (57)$$

根据式 (43) 和式 (46) 可知:

$$\left. \begin{aligned} A_j &= \frac{(1-\beta)(1+x)}{1+x} = 1-\beta \\ B_j &= \frac{\beta(1+x)}{1+x} = \beta \end{aligned} \right\} \quad (58)$$

$$A_i + B_i = A_j + B_j = 1 \quad (59)$$

CH_2 燃气中空气和纯燃气的摩尔分数 A_i 和 B_i , 可根据式 (57) 计算, 亦可直接查表 6。

不同 β 值 ($\beta = 0, 0.1, 0.2, \dots, 0.9, 1$) 的 $X_{i,\beta}^0$, $\Delta X'_{i,\beta}$ 以及 $X_{j,\beta}^0$, $\Delta X'_{j,\beta}$ 根据式 (55) 和 (56) 算出后, 按温度次序列于表中, 可直接查出, 然后再按式 (54) 计算出 $X_{n,\beta}$ 。例如:

$$\text{焓} \quad H_{n,\beta} = I(H_{i,\beta}^0 + \Delta H'_{i,\beta} \cdot P) + J(H_{j,\beta}^0 + \Delta H'_{j,\beta} \cdot P) \quad (60)$$

$$\text{对数相对压力} \quad \ln \pi_{n,\beta} = I(\ln \pi_{i,\beta}^0 + \Delta \ln \pi'_{i,\beta} \cdot P) + J(\ln \pi_{j,\beta}^0 + \Delta \ln \pi'_{j,\beta} \cdot P) \quad (61)$$

$$\text{定压摩尔热容} \quad C_{Pn,\beta} = I(C_{Pi,\beta}^0 + \Delta C'_{Pi,\beta} \cdot P) + J(C_{Pj,\beta}^0 + \Delta C'_{Pj,\beta} \cdot P) \quad (62)$$

$H_{i,\beta}^0$, $\Delta H'_{i,\beta}$, $H_{j,\beta}^0$, $\Delta H'_{j,\beta}$ 的值列于表 1 中; $\ln \pi_{i,\beta}^0$, $\Delta \ln \pi'_{i,\beta}$, $\ln \pi_{j,\beta}^0$, $\Delta \ln \pi'_{j,\beta}$ 的值列于表 2 中; $C_{Pi,\beta}^0$, $\Delta C'_{Pi,\beta}$, $C_{Pj,\beta}^0$, $\Delta C'_{Pj,\beta}$ 的值列于表 3 中。

余摩尔容积 $\Delta V_{n,\beta}$ 与压力无关, 所以摩尔容积

$$V_{n,\beta} = I(V_{i,\beta}^0 + \Delta V_{i,\beta}) + J(V_{j,\beta}^0 + \Delta V_{j,\beta})$$

由于在相同温度、相同压力下所有理想气体的摩尔容积都相同:

$$V_{i,\beta}^0 = V_{j,\beta}^0 = \frac{R_M T}{P} = \frac{P V^0}{P}$$

所以摩尔容积

$$V_{n,\beta} = \frac{P V^0}{P} + (I \Delta V_{i,\beta} + J \Delta V_{j,\beta}) \quad (63)$$

$P V^0$ 的值和不同 β 时的 $\Delta V_{i,\beta}$, $\Delta V_{j,\beta}$ 的值按温度序列于表 4 中.

$$\begin{aligned} \text{熵} \quad S_{n,\beta} &= \int \frac{C_{Pn,\beta}^0 dT}{T} - R_M \ln P + C + \Delta S_{n,\beta} \\ &= R_M \ln \pi_{n,\beta}^0 - R_M \ln P + C + R_M \Delta \ln \pi_{n,\beta} \\ &= 8.31441 [\ln \pi_{n,\beta} - \ln P_{\text{bar}}] + 178.8693 \text{ kJ}/(\text{kmol} \cdot \text{K}) \end{aligned} \quad (64)$$

对一定的混合气体,混合造成的熵增 ($-R_M \sum_i r_i \ln r_i$) 是一个常数,可以统一考虑在熵常数中. 本书对各种气体,无论单一气体或混合气体,采用相同的熵常数:

$$C = C_0 R_M - R_M \ln \frac{1}{1.01325} = 8.31441 (21.5 + \ln 1.01325) = 178.8693 \text{ kJ}/(\text{kmol} \cdot \text{K})$$

式中 1.01325 是 atm 和 bar 的换算常数, $C_0 = 21.5$, 参看第二部份(基本数据)关于 C_0 的说明.

定容摩尔热容

$$\begin{aligned} C_{Vn,\beta} &= C_{Pn,\beta}^0 + \Delta C_{Vn,\beta} = (C_{Pn,\beta}^0 - R_M) + R_M Z_c \Delta C_{Vn,\beta} \\ &= C_{Pn,\beta}^0 - R_M - R_M [2f'(T_r) + T_r f''(T_r)] P_r - R_M [f'(T_r)]^2 P_r^2 \\ &= C_{Pn,\beta}^0 - R_M T_r f''(T_r) P_r - R_M [1 + f'(T_r) P_r]^2 \\ &= C_{Pn,\beta} - R_M (1 - \Delta \ln \pi_{n,\beta})^2 \end{aligned} \quad (65)$$

式中 $C_{Pn,\beta}$ 根据式 (62) 计算; $\Delta \ln \pi_{n,\beta} = (I \Delta \ln \pi'_{i,\beta} + J \Delta \ln \pi'_{j,\beta}) P$.

比热比

$$\gamma_{n,\beta} = \frac{C_{Pn,\beta}}{C_{Vn,\beta}} \quad (66)$$

定熵指数

$$\begin{aligned} k_{n,\beta} &= -\frac{V}{P} \left(\frac{\partial P}{\partial V} \right)_S = -\frac{V}{P} \gamma_{n,\beta} \left(\frac{\partial P}{\partial V} \right)_T = Z_{n,\beta} \gamma_{n,\beta} \\ &= \frac{P V_{n,\beta}}{R_M T} \cdot \frac{C_{Pn,\beta}}{C_{Vn,\beta}} \quad [\text{对简化状态方程——式(24)}] \end{aligned} \quad (67)$$

式中 $V_{n,\beta}$ 根据式 (63) 计算.

音速

$$a_{n,\beta} = \sqrt{k_{n,\beta} P \frac{V_{n,\beta}}{M}} = P V_{n,\beta} \sqrt{\frac{1}{M R_M T} \cdot \frac{C_{Pn,\beta}}{C_{Vn,\beta}}} \quad (68)$$

根据式 (44) 和 (47) 可以求出燃料系数为 β 的 CH_n 燃气的平均分子量:

$$M = \frac{\beta(M_c + n M_H) + \left(1 + \frac{n}{4}\right)(1+x)M_a}{\frac{n}{4}\beta + \left(1 + \frac{n}{4}\right)(1+x)}$$

$$= \frac{(48.044 + 4.0316n)\beta + 138.274(4 + n)}{n\beta + 4.77382(4 + n)} \text{ kg/kmol} \quad (69)$$

其气体常数则为:

$$R = \frac{R_M}{M} = \frac{8.31441}{M} \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)} \quad (70)$$

不同 n 和 β 时的平均分子量 M 和气体常数 R 的值,可在表 5 中直接查得。

6. 燃烧室和后燃室中燃料系数的计算方法

在燃气轮机和喷气发动机中,燃烧室(或后燃室)出口的燃气温度是一个很重要的参数。它受到设备所能承受的最高温度的限制。燃烧室出口温度除了与进口温度有关外,最主要的还和燃料系数有关。常常需要根据给定的燃烧室出口温度,计算出相应的燃料系数,以达到通过燃料供应量控制燃气温度的目的。

空气和燃料进入燃烧室时的参数以及燃气流出燃烧室时的参数如图 2 所示。

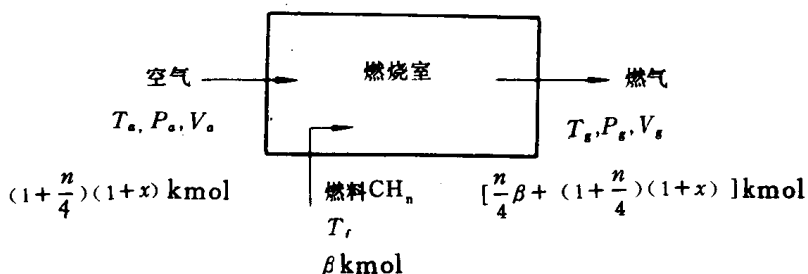


图 2

取 298.15K (25℃) 为基点温度,则可得能量方程如下:

$$\begin{aligned} & \left(1 + \frac{n}{4}\right)(1+x) \left[H_{\beta=0}^{(T^*, P_g)} - H_{\beta=0}^{(298.15, P_a)} \right] + \beta M_f \left[Q_L^{(298.15)} \cdot \eta_B + \int_{298.15}^{T_f} C_{pf} dT \right] \\ &= \left[\frac{n}{4} \beta + \left(1 + \frac{n}{4}\right)(1+x) \right] \left[H_{n,\beta}^{(T^*, P_g)} - H_{n,\beta}^{(298.15, P_g)} \right] \end{aligned}$$

式中 M_f 为 CH_n 燃料的分子量; $Q_L^{(298.15)}$ 为每 kg 燃料在 298.15K 时的低热值; c_{pf} 为燃料的定压比热; η_B 为燃烧室效率; T^* 表示滞止温度。式中

$$\begin{aligned} H_{n,\beta}^{(T^*, P_g)} - H_{n,\beta}^{(298.15, P_g)} &= [A_n H_{\beta=0}^{(T^*, P_g)} + B_n H_{n,\beta=1}^{(T^*, P_g)}] - [A_n H_{\beta=0}^{(298.15, P_g)} + B_n H_{n,\beta=1}^{(298.15, P_g)}] \\ &= A_n [H_{\beta=0}^{(T^*, P_g)} - H_{\beta=0}^{(298.15, P_g)}] + B_n [H_{n,\beta=1}^{(T^*, P_g)} - H_{n,\beta=1}^{(298.15, P_g)}] \end{aligned}$$

从式 (44) 和式 (47) 可知:

$$A_n = \frac{(1-\beta) \left(1 + \frac{n}{4}\right)(1+x)}{\frac{n}{4} \beta + \left(1 + \frac{n}{4}\right)(1+x)} \quad B_n = \frac{\beta \left[\left(1 + \frac{n}{2}\right) + \left(1 + \frac{n}{4}\right)x \right]}{\frac{n}{4} \beta + \left(1 + \frac{n}{4}\right)(1+x)}$$

代入能量方程并将全式乘以 4 得:

$$\begin{aligned} (4+n)(1+x) [H_{\beta=0}^{(T_g^*, P_g)} - H_{\beta=0}^{(298.15, P_g)}] + 4\beta M_f \left[Q_L^{(298.15)} \cdot \eta_B + \int_{298.15}^{T_f} c_{pf} dT \right] \\ = (1-\beta)(4+n)(1+x) [H_{\beta=0}^{(T_g^*, P_g)} - H_{\beta=0}^{(298.15, P_g)}] \\ + \beta [(4+2n) + (4+n)x] [H_{n,\beta=1}^{(T_g^*, P_g)} - H_{n,\beta=1}^{(298.15, P_g)}] \end{aligned}$$

考虑到式中 $(1+x) = 4.77382$, $M_f = 12.011 + 1.0079n$, 从而解得:

$$\beta = \frac{4.77382(4+n) \{ [H_{\beta=0}^{(T_g^*, P_g)} - H_{\beta=0}^{(298.15, P_g)}] - [H_{\beta=0}^{(T_g^*, P_g)} - H_{\beta=0}^{(298.15, P_g)}] \}}{(48.044 + 4.0316n) \left[Q_L^{(298.15)} \cdot \eta_B + \int_{298.15}^{T_f} c_{pf} dT \right] + 4.77382(4+n) [H_{\beta=0}^{(T_g^*, P_g)} - H_{\beta=0}^{(298.15, P_g)}] - (19.09528 + 5.77382n) [H_{n,\beta=1}^{(T_g^*, P_g)} - H_{n,\beta=1}^{(298.15, P_g)}]} \quad (71)$$

式中

$$\begin{aligned} H_{\beta=0}^{(T_g^*, P_g)} &= H_{\beta=0}^{(T_g, P_g)} + \frac{M_g v_g^2}{2} = [H_{\beta=0}^{(T_g)} + \Delta H_{\beta=0}'^{(T_g)} \cdot P_g] + \frac{M_g v_g^2}{2} \\ H_{\beta=0}^{(T_a^*, P_a)} &= H_{\beta=0}^{(T_a, P_a)} + \frac{M_a v_a^2}{2} = [H_{\beta=0}^{(T_a)} + \Delta H_{\beta=0}'^{(T_a)} \cdot P_a] + \frac{M_a v_a^2}{2} \\ H_{n,\beta=1}^{(T_g^*, P_g)} &= H_{n,\beta=1}^{(T_g, P_g)} + \frac{M_{n,\beta=1} \cdot v_g^2}{2} = I H_{i,\beta=1}^{(T_g, P_g)} + J H_{j,\beta=1}^{(T_g, P_g)} + \frac{M_{n,\beta=1} \cdot v_g^2}{2} \\ &= \frac{15.32146n}{19.09528 + 5.77382n} [H_{i,\beta=1}^{(T_g)} + \Delta H_{i,\beta=1}'^{(T_g)} \cdot P_g] \\ &+ \frac{19.09528 - 9.54764n}{19.09528 + 5.77382n} [H_{j,\beta=1}^{(T_g)} + \Delta H_{j,\beta=1}'^{(T_g)} \cdot P_g] + \frac{M_{n,\beta=1} \cdot v_g^2}{2} \end{aligned}$$

给出燃烧室进出口气流及燃料的有关参数后,即可由式(71)计算出相应的燃料系数(参阅例 12)。

对于后燃室,情况与燃烧室有所不同。进入后燃室的不是空气而是燃气(设其燃料系

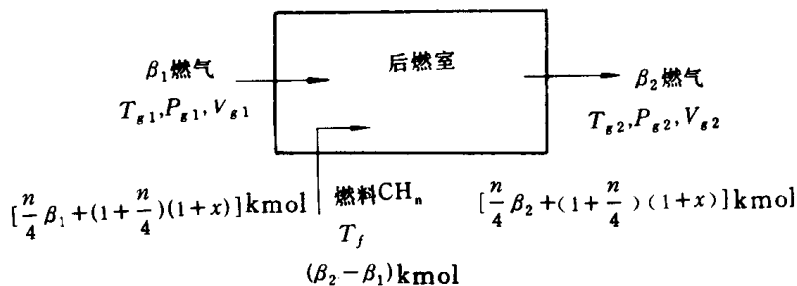


图 3

数为 β_1 , 参阅图 3), 在后燃室中进一步喷入燃料燃烧, 提高燃气温度(设所产生的燃气的燃料系数为 β_2). 这时能量方程为: