

焓值表及其应用

国防工业出版社

383672

V235.11/14

焓值表及其应用

范作民 编著

1K27/01

国防工业出版社

内 容 简 介

本书介绍了等温燃烧焓差及焓差系数的概念,利用等温燃烧焓差和焓差系数可以迅速而准确地进行燃烧过程的热力计算,如计算燃气的焓值、燃烧过程所需油气比、燃烧效率以及燃烧产物的温度等。书中给出了有关的计算公式及以下的燃气焓值表:

1. $-49\sim 1500^{\circ}\text{C}$ 温度范围内的空气焓值与等温燃烧焓差(温度间隔 1°C)以及焓差系数(温度间隔 10°C ,燃料为 C_8H_{16} ,不考虑热分解现象),

2. $1501\sim 2300^{\circ}\text{C}$ 温度范围内的空气焓值与等温燃烧焓差以及焓差系数,温度间隔同上;

3. $600\sim 4500^{\circ}\text{R}$ 温度范围内空气-碳氢燃料 C_nH_{2n} 系统的化学平衡状态燃烧产物的空气焓值与等温燃烧焓差(温度间隔 100°R)。

书中有附表 6 个,图 1 个,列出参考文献 12 种。

本书可供燃气轮机和空气喷气发动机专业的设计及研究人员以及高等院校学员参考。

焓值表及其应用

范作民 编著

*

国防工业出版社出版

北京市书刊出版业营业许可证出字第 074 号

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

$787\times 1092^{1/32}$ 印张 $3^{13/16}$ 77 千字

1976年12月第一版 1976年12月第一次印刷 印数: 0,001— 4,400册

统一书号: 15034·1532 定价: 0.49 元

(限国内发行)

目 录

前言

符号说明

§ 1	根据空气焓值与等温燃烧焓差确定任意余气系数 下燃烧产物的焓值	9
§ 2	燃烧过程所需油气比和燃烧效率的计算	19
§ 3	燃烧过程燃气温度的计算	34
一	根据混气的成分与燃气焓值计算燃气温度	34
二	燃烧过程燃烧产物温度的计算	36
§ 4	燃气的平均定压比热与绝热指数	37
§ 5	燃烧过程效率系数的计算	40
表 1	燃气的焓值表 (未计入热分解影响)	46
表 2	燃气的绝热指数 (燃料: C_8H_{16})	105
表 3	燃气的分子量和气体常数 (燃料: C_8H_{16})	106
表 4	b 值表	107
表 5	空气- C_nH_{2n} 系统化学平衡状态燃气焓值表 ($L = 14.788$)	108
表 6	冻结膨胀过程的燃气绝热指数 k_f	119

前 言

在空气喷气发动机的热力计算和特性计算中，在空气喷气发动机燃烧室和加力燃烧室的设计和试验研究中，需要进行燃烧过程的热力计算。例如，在空气喷气发动机的热力计算和特性计算中，需要根据给定的燃气温度算出所需要的燃料流量与空气流量的比值——油气比；在燃气涡轮发动机燃烧室的设计计算中，需要根据已知的混气油气比来计算其燃气温度；在燃烧室及加力燃烧室的试验研究中，则需要根据已知的混气油气比及燃烧产物的温度来确定其燃烧效率。这些计算是建立在流过燃烧室气流的热焓方程基础上的。为进行上述的有关计算，首先要有一个燃气的焓值表。然而，在燃烧过程热焓方程的直接形式中包含有任意油气比下的燃气焓值，这就产生了一些困难。首先，由于通常的燃气热力性质表或相应的图线只能给出有限的几个油气比下的焓值，因此在计算中往往需要利用插值法来求出已知油气比下的焓值，这不仅增加了计算的工作量，而且也不容易得到准确的结果；其次，在根据燃气温度计算所需的油气比时，由于燃气的焓值与燃气的油气比有关而油气比又是待求的，因此还要进行试算。然而，目前所广泛采用的就是这样的计算方法。

实际上，当气体热分解的影响可以略去不计时，上述的困难是可以避免的。在这种条件下，任何一个油气比的燃气都可以看成是由其他两种给定的油气比的燃气按一定比例混合而成的。因此，对于燃烧过程的计算，只需要知道某两种

油气比下的燃气焓值就可以了。这两种燃气可以这样选取：一种燃气取为燃料与理论空气量的完全燃烧产物（当量比等于1）；另一种燃气取为纯空气（当量比等于零）。这种处理方法是在文献〔1〕与文献〔2〕中提出来的。

在文献〔5〕中给出了一种计算燃烧过程所需油气比的更为简单的计算公式。正如本书中所表明的，这一公式可以在文献〔1〕与文献〔2〕的处理方法的基础上，通过引入等温燃烧焓差的概念来得到。

利用等温燃烧焓差的概念进行燃烧过程的热力计算是非常简单而又准确的，然而，这种方法在目前尚未得到广泛的采用。

在本书中我们将对这种计算方法进行详细的讨论。书中给出了利用等温燃烧焓差的概念进行燃烧过程热力计算的有关公式及所需的焓值表。

当计入气体热分解影响时，在一定的准确度范围内，仍然可以使用这一方法来简化计算。

在上面提到的各种计算方法中，在计算燃烧产物的温度时，一般说来，都需要进行试算。本书提出了一种方法，可以在实际上消除试算的麻烦。这是通过引入焓差系数实现的。

燃烧效率是评价燃烧过程性能好坏的一个重要指标。在不同的文献中所用到的燃烧效率的定义并不完全一致。本书中所给出的是比较常见的一种定义。书中对这种燃烧效率的定义及其物理意义中某些容易使人误解之处也作了适当的说明。

文献〔12〕中所提出的效率系数是评定燃烧室性能的另一个重要参数。这一概念在目前也未得到应有的注意。书中也

对这一性能参数进行了介绍与讨论。

书中给出的焓值表适用于空气与碳氢燃料 C_nH_{2n} 的反应系统。碳氢燃料 C_nH_{2n} 可作为空气喷气发动机所用的大多数燃料的代表。

在本书的编写过程中，得到了杜声桐、刘美菊、张德顺以及其他许多同志的热情帮助和支持，在此表示衷心的感谢。

由于作者水平有限，错误和不妥之处在所难免，欢迎广大读者批评指正。

符 号 说 明

$$a = \frac{H}{i_a} \text{——焓差系数;}$$

$$b = \frac{i_a}{i_a} \text{——焓值系数;}$$

c_p ——定压比热;

$$f = \frac{G_f}{G_a} = \frac{1}{\alpha L} \text{——油气比;}$$

$$g = \frac{G_a}{G_f} = \alpha L \text{——气油比;}$$

G_f ——燃料流量, 公斤/秒;

G_a ——空气流量, 公斤/秒;

$H = (1 + \alpha L)i_a - \alpha Li_a$ ——对应于 1 公斤燃料的等温燃烧焓差, 千卡/公斤;

H_u ——燃料的低热值, 千卡/公斤;

i_a ——空气的焓值, 千卡/公斤;

i_a ——余气系数为 α 的燃气的焓值, 千卡/公斤;

$\Delta i_f = i_f - i_{f0}$ ——由于温差引起的燃料焓差, 千卡/公斤;

I ——总焓 (绝对焓), 千卡/公斤;

k ——绝热指数;

L ——1 公斤燃料完全燃烧所需之理论空气量,
公斤空气/公斤燃料;

p ——气体压力, 公斤/厘米²;

R ——气体常数, 公斤·米/公斤·°K;

T ——绝对温度 ($^{\circ}\text{K}$) 或兰氏温度 ($^{\circ}\text{R}$);

t ——摄氏温度, $^{\circ}\text{C}$;

X ——化学能, 千卡/公斤;

$\alpha = \frac{G_a}{G_f L}$ ——余气系数;

η ——燃烧效率;

μ ——分子量;

ξ ——放热系数;

$\phi = \frac{1}{\alpha}$ ——当量比。

上注脚: * ——滞止参数。

下注脚: 0 ——测定热值时的温度 ($15 \sim 25^{\circ}\text{C}$);

2 ——燃烧室进口截面;

3 ——燃烧室出口截面;

4 ——加力燃烧室或带有直接加温器的燃烧室进口截面;

5 ——加力燃烧室或带有直接加温器的燃烧室出口截面;

A ——加力燃烧室或带有直接加温器的燃烧室;

a ——空气;

c ——燃烧室或直接加温器;

f ——燃料;

m ——平均值;

α ——余气系数为 α 的燃气。

§ 1 根据空气焓值与等温燃烧焓差确定 任意余气系数下燃烧产物的焓值

在燃烧过程的热力计算中,常常要用到燃烧产物的焓值。燃烧产物的焓值与燃气温度和燃气成分(余气系数 α)有关。通常的燃气热力性质表或相应的曲线只能给出有限的几个余气系数下的焓值,应用起来既不方便也不准确。文献〔1〕与文献〔2〕指出,在气体的热分解现象可以忽略不计的情况下,当 $\alpha \geq 1$ 时,1公斤燃料与 L 公斤空气的完全燃烧产物可以认为是由1公斤燃料与 L 公斤空气的完全燃烧产物和剩余的 $(\alpha - 1)L$ 公斤的纯空气所组成。因此有

$$(1 + \alpha L)i_a = (1 + L)i_{a-1} + (\alpha - 1)Li_a \quad (1-1)$$

在文献〔2〕中用的是以摩尔为单位的焓值,因此所得到的关系式在形式上与(1-1)式有所不同。

公式(1-1)只适用于气体热分解现象可以忽略不计的情况下。气体的热分解现象与气体的温度、压力及油气比有关,气体的温度愈高、压力愈低以及当量比愈接近于1,则气体的热分解现象愈严重。在下表中给出了在同一焓值下,对应于该压力下的温度与对应于 $p = 30$ 大气压的温度之差 $\Delta T(^{\circ}\text{K})$:

温度差 $\Delta T (^{\circ}\text{K})$

$T^{\circ}\text{K}$	$p = 0.1$ 大气压			$p = 1$ 大气压		
	$\phi = 1.0$	$\phi = 0.7$	$\phi = 0.25$	$\phi = 1.0$	$\phi = 0.7$	$\phi = 0.25$
1500	1.7	0.34	0.30	0.7	0	0
1666.7	7	1.7	1	2.6	0.7	0.3
1777.8	16	4.2	2.9	6	1.3	1.0
2000	60	23	4	23	7.2	4.7
2277.8	190	123	73	74	38	22
2500	~330	>280	197	141	103	62

由上表可见,一般说来,当 $T \leq 1500^\circ\text{K}$ 时,可以忽略热分解影响;而 $p \geq 1$ 大气压及 $\phi \leq 0.7$,当 $T \leq 1800^\circ\text{K}$ 时,可以忽略热分解的影响。

(1-1) 式表明,某一个余气系数 α 下的燃气焓值可以由 $\alpha = 1$ 的完全燃烧产物的焓值与纯空气的焓值来确定。

(1-1) 式可以写为:

$$(1 + \alpha L)i_a = \alpha Li_a + [(1 + L)i_{a-1} - Li_a]。 \quad (1-2)$$

令

$$H = (1 + L)i_{a-1} - Li_a = i_{a-1} + L(i_{a-1} - i_a), \quad (1-3)$$

则 (1-2) 式可以写为

$$(1 + \alpha L)i_a = \alpha Li_a + H, \quad (1-4)$$

或 (注意到 $f = 1/\alpha L$)

$$(1 + f)i_a = i_a + fH。 \quad (1-4')$$

于是

$$i_a = \frac{i_a + fH}{1 + f}。 \quad (1-5)$$

由 (1-5) 式可知,某一油气比下的燃气焓值可以由空气焓值 i_a 与等温燃烧焓差 H 来确定。

(1-5) 式可以写为

$$\begin{aligned} i_a &= \frac{(1 + f)i_a - fi_a + fH}{1 + f} \\ &= i_a + \frac{f(H - i_a)}{1 + f} \\ &= i_a + \frac{H - i_a}{1 + g}。 \end{aligned} \quad (1-6)$$

(1-6) 式中等式右边第一项通常比第二项大十倍以上,在计算时如果 (1-6) 式右边第二项能够得到三位有效数字

的话, 则 i_a 就可得到四位有效数字。因此, 当用计算尺进行计算时, 采用 (1-6) 式可以提高计算结果的准确度。

由 (1-4) 式可知, H 的物理意义为 1 公斤燃料与 αL 公斤空气的燃烧产物的焓值与同温度下燃烧前的 αL 公斤空气焓值之差。因此, H 可称为等温燃烧焓差。在燃烧过程的热力计算中, H 是个很有用的参数。

应当指出, 对于一定的化学反应系统, 等温燃烧焓差 H 只是温度的函数 (在不计气体热分解影响的条件下)。这一点很容易由 (1-3) 式看出。于是, (1-4') 式表明, 对应于 1 公斤原始空气的燃气焓值 $(1+f)i_a$ 与该油气比 f 成线性关系, 其斜率就是等温燃烧焓差 H 。根据这一关系不难直接写出比 (1-3) 或 (1-4) 式更为普遍的 H 的关系式:

$$H = \frac{(1+f_2)i_2 - (1+f_1)i_1}{f_2 - f_1} \quad (1-7)$$

式中 i_1 与 i_2 分别为对应于 f_1 与 f_2 的燃气焓值 (在相同的温度下)。

(1-7) 式也可以利用 (1-4') 式来证明。对于油气比为 f_1 的燃气, 有

$$(1+f_1)i_1 = i_a + f_1 H,$$

对于油气比为 f_2 的燃气, 在相同的温度条件下, 有

$$(1+f_2)i_2 = i_a + f_2 H,$$

以上两式相减, 便得到 (1-7) 式。

对于有预燃过程的燃烧过程 (如燃气涡轮发动机的加力燃烧室), 如果预燃过程 (燃烧室) 的油气比为 f_c , 预燃后的燃烧过程 (加力燃烧室) 的油气比为 f_A (供入加力燃烧室的燃料量与预燃过程前通过燃烧室的总空气量之比), 则有

$$H = \frac{(1 + f_c + f_A)i_5 - (1 + f_c)i_3}{f_A}, \quad (1-7')$$

式中 i_3 与 i_5 分别代表燃烧过程（加力燃烧室）进出口的燃气焓值。

在表 1 中给出了空气焓值 i_a 与等温燃烧焓差 H 的数值，温度范围为 $-49 \sim 2300^\circ\text{C}$ ，温度间隔为 1°C 。 i_a 值取自文献〔4〕（ $t \leq 1500^\circ\text{C}$ ）及文献〔5〕（ $t > 1500^\circ\text{C}$ ，每 10°C 间的温度下的焓值按线性插值法算出）。焓值的计算起点为 0°C ，因此需把文献〔4〕与文献〔5〕的空气焓值减去 0°C 时的数值（65.26 千卡/公斤）。当 $t < 41^\circ\text{C}$ 时，这样得出的 i_a 值只有 2~3 位有效数字。因此 $t < 50^\circ\text{C}$ 的 i_a 值是根据文献〔4〕给出的比热值算出的。 $t \leq 1500^\circ\text{C}$ 的 H 值是根据文献〔2〕所给出的 $\alpha = 1$ 的燃气焓值利用（1-3）式算出的（为了得到以 0°C 为计算起点的 H 值，都减去了 0°C 时的 H 值 96.67 千卡/公斤）。每隔 10°C 计算一点，中间温度下的 H 值按线性插值法算出。这样算出的 H 值在绝对值上可能有 0.05 千卡/公斤的误差。然而，由于在（1-5）式中 fH 一项的数值通常不到 i_a 值的十分之一（例如当 $\alpha = 2.5$ ， $t = 1000^\circ\text{C}$ 时， $i_a = 260.51$ 千卡/公斤，而 $fH = 17.68$ 千卡/公斤），因此所算出的 i_a 绝对值的误差将不会超过 0.005 千卡/公斤，即可以保证 i_a 有 4~5 位有效数字。 $t > 1500^\circ\text{C}$ 时的 H 值取自文献〔5〕（也减去了 0°C 时之值），每 10°C 间按线性插值法计算。根据文献〔5〕算出的 H 值与按文献〔2〕算出的 H 值不完全相等（因此在表 1 的 1500°C 与 1501°C 间 H 值有一个突跃的变化）。下表中给出了几个温度下按文献〔5〕算出的 H 值与按文献〔2〕算出的 H 值之比 $\bar{H}$ ，必要时可以根据 $\bar{H}$ 值进行修正，一般说来，这一差别不会给计算带

来太大影响。

$t\text{ }^{\circ}\text{C}$	100	500	750	1000	1250	1500
$\bar{H}$	1.0353	1.0273	1.0250	1.0266	1.0276	1.0282

文献〔6〕给出了按文献〔5〕算出的温度间隔为 1°C 的 H 值。

文献〔2〕给出的 $\alpha = 1$ 的燃气的焓值是根据燃料成分为 C_8H_{18} 得出的。空气喷气发动机上所用的煤油的燃气热力性质与 C_nH_{2n} 相当接近。按文献〔2〕, C_8H_{18} 的理论所需空气量 L 值为 14.760, 燃气的绝热指数 k 与分子量 μ 和气体常数 R 分别见表 2 与表 3 (数据取自文献〔2])。

(1-6) 式还可写为

$$i_a = \left(\frac{g + a}{g + 1} \right) i_u, \quad (1-8)$$

式中

$$a = \frac{H}{i_u}, \quad (1-9)$$

称为焓差系数。

在表 1 中也给出了 a 的数值。可以看到, 焓差系数 a 随气体温度的变化是很平缓的。由于这样一个特点, 再加上 a 值通常又比 g 值小得多。因而(1-8)式中的 $(g + a)/(g + 1)$ 值随温度的变化是很小的。当燃气的焓值 i_u 及气油比 g 为已知时, 利用这一个特点就很容易求出相应的空气焓值和相应的温度。这一点在下面还要加以详细说明。在表 1 中, a 的数值是按温度间隔 10°C 给出的, 这完全可以满足计算所需的准确度了。

令

$$b = \frac{g + a}{g + 1}, \quad (1-10)$$

则可得

$$i_a = b i_{a0} \quad (1-11)$$

因此 b 可称为焓值系数。

b 值与燃气成分及燃气温度有关, 其值在表 4 中给出。当计算的准确度要求不是很高时, 利用 (1-11) 式及表 4 中的 b 值计算 i_a 是十分方便的。

文献〔2, 4, 5〕所给出的焓值是按理想气体算出的。对于实际气体, 其焓值还与气体的压力有关。随着压力的增加, 实际气体的焓值也增加。表 1 所给出的数据相当于气体压力为零时的数值。图 1 给出了使焓值比 $p = 0$ 时的焓值 (均为从 0°K 计算的) 增加 0.5% 时的压力 (极限压力) 与气体温度的关系。数据取自文献〔4〕。在燃气轮机通常遇到的温度下,

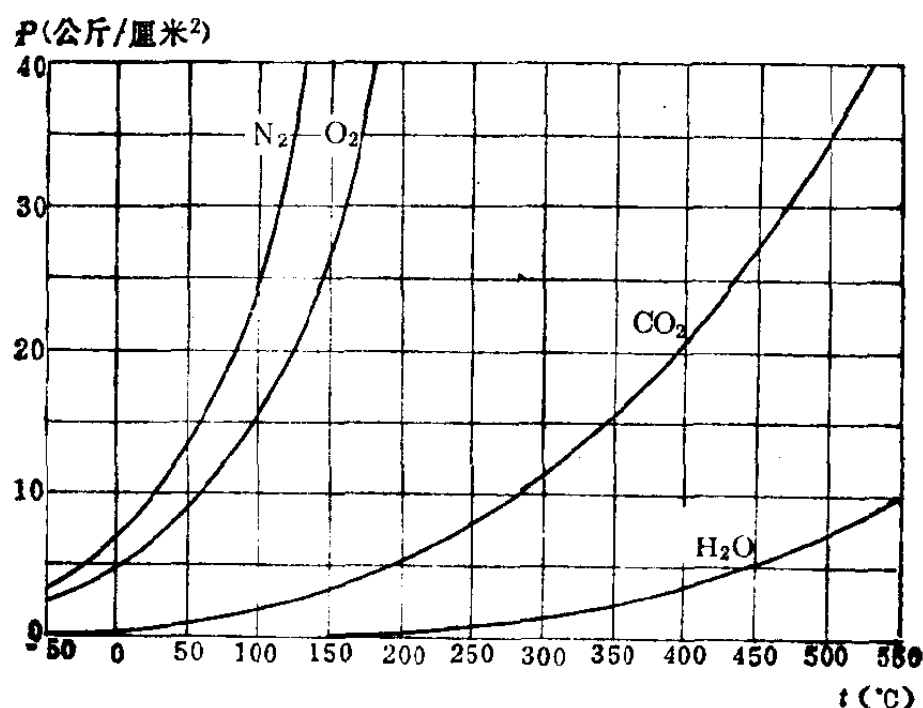


图 1 极限压力与温度的关系

当压力 $< 25 \sim 30$ 公斤/厘米² 时, 可以忽略气体压力对于气体焓值的影响^[4]。

前面已经指出, 上述的计算关系只适用于气体热分解影响可以忽略不计的情况。当气体热分解影响不能忽略时, 空气与燃气的成分将随气体的温度和压力而变化, 这时需要计入气体的化学能的变化。气体的焓与化学能之和称为总焓^[7,8]或绝对焓^[3], 以大写字母 I 代表, 即

$$I = i + X, \quad (1-12)$$

式中 X 为气体的化学能。

当不计气体热分解影响时, (1-4') 的关系式对于总焓也是适用的, 即

$$(1 + f) I = I_a + fH, \quad (1-13)$$

(1-13) 式中的 H 代表的是计入化学能在内的等温燃烧总焓差, 为简单起见, 这里不再用另外的字母来代表它。

当计入气体热分解影响时, (1-13) 式将不再成立, 换言之, 这时的 $(1 + f) I$ 与 f 的关系将不再是线性关系。然而, 如果将整个贫油油气比范围 $f = 0 \sim 1.0$ 分为几个区域, 那么, 只要每一个区域的 f 的变化范围足够小, 就可以近似地认为 $(1 + f) I$ 与 f 成线性关系。假设可以被当作线性关系处理的油气比变化范围的端点为 f_1 与 f_2 , 则对于某一个温度, 有

$$(1 + f) I = C_A + fC_H, \quad (1-14)$$

式中 $f_1 \leq f \leq f_2$;

C_A 与 C_H 为线性关系式中的常数。

将 (1-14) 式与 (1-13) 式对比可见, 从数学形式上来说, C_A 值相当于 (1-13) 式中的空气总焓, C_H 值相当于

(1-13)式中的等温燃烧总焓差。当然,一般来说 C_A 与 C_H 将不再具有 I_a 与 H 的物理意义了。因此,在计入气体热分解影响的条件下,某一油气比下的气体总焓可以近似地按照与(1-4')式类似的(1-14)式来确定。这时对于一定的油气比范围,只需要知道 C_A 与 C_H 这两个常数就可以了。 C_A 与 C_H 的数值应当由对应于 f_1 与 f_2 的气体总焓来确定。当 $f = f_1$ 时,有

$$(1+f_1)I_1 = C_A + f_1 C_H,$$

当 $f = f_2$ 时,有

$$(1+f_2)I_2 = C_A + f_2 C_H.$$

解以上两式得

$$C_H = \frac{(1+f_2)I_2 - (1+f_1)I_1}{f_2 - f_1} \quad (1-15)$$

及

$$C_A = \frac{f_2(1+f_1)I_1 - f_1(1+f_2)I_2}{f_2 - f_1}. \quad (1-16)$$

为了计算以温度 T° 为计算起点的总焓,可以将(1-14)式写为

$$(1+f)(I - I^\circ) = (C_A - C_A^\circ) + f(C_H - C_H^\circ), \quad (1-14')$$

式中 I° 、 C_A° 与 C_H° 分别为对应于温度 T° 时的 I 、 C_A 与 C_H 值。

令

$$A = C_A - C_A^\circ,$$

$$H' = C_H - C_H^\circ$$

及

$$I' = I - I^\circ,$$

则有