

THERMODYNAMIC ANALYSIS OF COMBUSTION ENGINES

535767

〔美〕A.S.坎贝尔 著

燃烧发动机 热力学分析

中国农业机械出版社

535767

V231.1/06

V231.1/06

燃烧发动机热力学分析

[美]A.S.坎贝尔 著

葛贤康 张正举 曾利权 译

李淑芬 校



C0195584

中国农业机械出版社

V231.1
06

THERMODYNAMIC ANALYSIS OF
COMBUSTION ENGINES
ASHLEY S. CAMPBELL
JOHN WILEY & SONS, INC.

1979

燃烧发动机热力学分析

〔美〕A.S.坎贝尔 著

葛贤康 张正举 曾利权 译

李淑芬 校

中国农业机械出版社出版

北京市海淀区阜成路东钓鱼台乙七号

房山县南召印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

新华书店经售

850×1168大32开 11 6/16 印张 300 千字

1983年12月北京第一版·1983年12月北京第一次印刷

印数：0,001—5,000 定价：1.45元

统一书号：15216·151

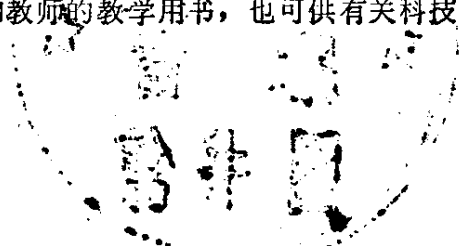
内 容 简 介

本书为美国Maine大学热力学第二教程的教材，主要讨论燃烧发动机的燃烧理论，研究适用于各种燃烧发动机的分析方法和计算程序。

本书以四冲程内燃机为主，对奥托循环与狄塞尔循环发动机的燃料空气比、转速、节流、气门定时、点火或喷油提前、燃烧持续时间、燃烧速率、增压等设计和工作性能作了详尽的论述，并特别强调分析过程的表达和代数表达式的探讨，以便为编制计算机程序打下基础。对于其它有关燃烧发动机和燃烧装置，诸如燃气轮机、火箭发动机、自由活塞发动机、锅炉和炉子等本书也作了简要的介绍。同时，对于一些必要的理论基础，特别是有关化学平衡的基础知识，本书也作了比较充分的阐述。

全书共分十五章，每章之末附有参考文献和思考题。书后并附有各种附录。

本书可作为大专院校动力类有关专业及工程热物理专业的学生、研究生和教师的教学用书，也可供有关科技人员阅读参考。



译 者 的 话

七十年代以来,国外(如美国、日本等)某些大学开始将内燃机与外燃机合在一起,对高年级大学生和研究生开设了《燃烧发动机》(Combustion Engines)选修课程。

美国缅因大学 A.S.坎贝尔所著《燃烧发动机热力学分析》(Thermodynamic Analysis of Combustion Engines)一书即系为适应此种改革而编写的热力学第二教程的教材,供高年级大学生和研究生使用。

本书主要论述内燃机的燃烧理论,并对其它燃烧发动机和装置作了简要的介绍;同时,对于一些必要的有关理论基础也作了比较充分的阐述。本书取材广泛,内容新颖,着重研究适用于各种燃烧发动机的分析方法和计算程序,以便为编制计算机程序打下基础。

本书可作为大专院校、动力类有关专业及工程热物理专业的学生、研究生和教师的教学用书,也可供有关科技人员阅读参考。

本书第一~四章及附录由曾利权译,第五、六章由葛贤康译,第七~十五章由张正举译,译后进行互校,最后由李淑芬对全书作了总校。限于译者水平,不妥之处,敬希读者批评指正。

1982年2月

序

本书可作为热力学第二教程的教材，它主要讨论燃烧理论。本书的目的是研究用于由燃烧产生运动的各种系统的分析方法和计算程序。

大多数介绍热力学的教科书都推导出机械工程师所感兴趣的空气标准循环的热效率表达式。本书也从这点出发。头三章研究反应热、绝热火焰温度和状态的定熵变化，并提出基本方法。研究采用近似法，以仅由物质守恒定律就可从反应混合物成分获得燃烧产物成分这一假设作为基础。下面几章研究燃气轮机系统、四冲程和两冲程发动机、火箭发动机、自由活塞发动机和锅炉与炉子，目的在于尽可能深入地进行热力学分析。各章节的性能计算都用表格和图线表示。虽然还可以增加许多内容，但由于给定的燃烧发动机工作参数的项目很多，故只选择能够说明理论问题而且能向读者提供可与他们自己的计算结果相比较的表格和图线。只有涉及到对热力学分析有影响的问题时，才对发动机设计细节进行讨论。

第十章介绍化学平衡概念。计算平衡成分的主要方程直接列出，而对后面的数学方程的求解方法讨论得比较深入，因为在其他教材中我认为需要充分阐明的多反应系统的问题都未能讨论得十分详尽。第十一章和第十二章介绍几种简单系统的求解方法。

第十三章进一步研究绝热火焰温度和平衡系统的定熵膨胀计算。第十四章概述化学平衡对性能计算会产生重大影响的若干情况。

第十五章介绍火箭固体燃料和枪炮粉状燃料燃烧的简要处理方法。

数值及其推导方法是本书自始至终关注的问题。发动机至少

在理论上会有多种多样的尺寸、形状和结构。工作参数的数值范围也能确定得很宽。这些考虑与数值解法的迭代特点要求编制计算机程序。这都不特别复杂，只是要组织得好，使函数程序和子程序使用方便。大部分程序都编制得长短合理，只是当比文字说明更能清楚地解释一系列计算时，才采用流程图。事先准备好一张流程图是编程序的最先步骤，这留给读者自己去做。

SI 单位制的概述和理想气体性质的简要说明放在附录 A。附录 B 阐述了求解 $F(T)=0$ 类型的两种通用演算方法。该方程在燃烧问题中一再出现。对于课堂实践也极为精确有效的计算热力学性质的代数表达式在附录 C 中介绍。表上所列举的特性数值都引自公开发表的学术报告，这些都列于附录 E。附录 D 进一步讨论了以吉布自由焓为基础的化学平衡与第十章中以熵为基础的处理方法相对照。

我在这里只研究了有限的几个问题。练习题也未给予重视，甚至几乎没有什么练习的机会。我所提供的材料总是想力图能激发读者提出值得探讨和值得解决的问题。

我深深地感谢缅因大学给我休假期的待遇，从而使我有可能把分散的教学笔记汇集起来，整理成完整的著作。

A.S. 坎贝尔

目 录

译者的话

序

第一章	反应热	1
第二章	绝热火焰温度	8
第三章	状态的定熵变化	28
第四章	燃气轮机循环	35
第五章	四冲程内燃机	62
第六章	两冲程内燃机	170
第七章	火箭发动机	188
第八章	自由活塞发动机	224
第九章	锅炉和炉子	239
第十章	化学平衡	248
第十一章	C/H/O/N系统的化学平衡	270
第十二章	H/O/N系统中的化学平衡	287
第十三章	化学平衡系统中绝热火焰温度与定熵膨胀	295
第十四章	化学平衡对性能计算的影响	303
第十五章	固体燃料与粉状燃料	312
附录A	SI单位制, 气体和气体混合物的热力学性质	326
附录B	$F(T) = 0$ 的解法	332
附录C	热力学函数的代数表达式	337
附录D	化学平衡的进一步讨论	341
附录E	热力学性质表	348
	各种符号的定义	355

第一章 反 应 热

当燃料燃烧时，与燃料和氧分子的化学键有关的能量会被释放出来，首先表现出来的是产物气体的热效应。燃烧产物最终达到的温度取决于许多因素：燃料（如果一种以上的燃料参加，则为多种燃料）及其组成成分，以及反应混合物的温度和压力。燃料的状态，无论是液态或者气态，都对产物温度有影响。燃烧是气体分子之间发生的反应。如果参与反应的是液体燃料，那它首先必须汽化。反应系统所承受的外部限制条件将影响产物气体的温度。例如，定压燃烧与定容燃烧就将导致不同的温度。

为了计算产物气体的温度，需要知道各种燃料的能量特性，即反应热、热值、燃烧热和燃烧焓。在本书中，我们使用“反应热”这个术语。在燃烧热力学中，反应热占有很重要的位置。反应热的定义如下：

当一个单位数量的燃料与化学标准量的氧燃烧时，反应热 $H_{r,p}$ 和 $U_{r,p}$ 分别表示反应发生在定压和定容情况下燃烧产物回复到反应物的初始温度 25°C （即 298K ）所附加的能量。

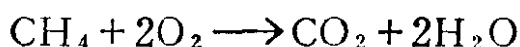
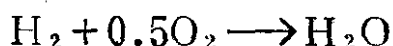
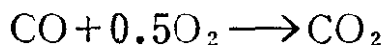
必须注意， $H_{r,p}$ 和 $U_{r,p}$ 是两个负值。（许多反应具有正的反应热。把附加能量选择作为反应热的度量只是一个惯例。）此外， $H_{r,p}$ 和 $U_{r,p}$ 是燃料的特性，特别是指与化学标准量氧的混合物在 298K 时的反应有关，也是实测量。

可以很方便地对有关能量的两个术语 Q_p 和 Q_v 定义如下：

当一个单位量的燃料燃烧时， Q_p 和 Q_v 分别表示反应发生在定压和定容的情况下把燃烧产物冷却到反应物温度 T 时所释放出来的能量。

注意， Q_p 和 Q_v 是两个正数。它们是反应混合物的特性，与温度有关，并且是从反应热计算得来的量。

化学标准（或者化学计算量）混合物反应结果只产生 CO_2 或 H_2O ，或者两者都有。下面举几个例子：



定压反应热 H_{rp} 是用连续流动热量计进行测量的，其简化原理图如图1.1所示。燃料和超过化学标准量的空气以298K进入反应室中，反应产物被水套中的循环水冷却到进口温度。对于稳定流动，能量守恒要求：

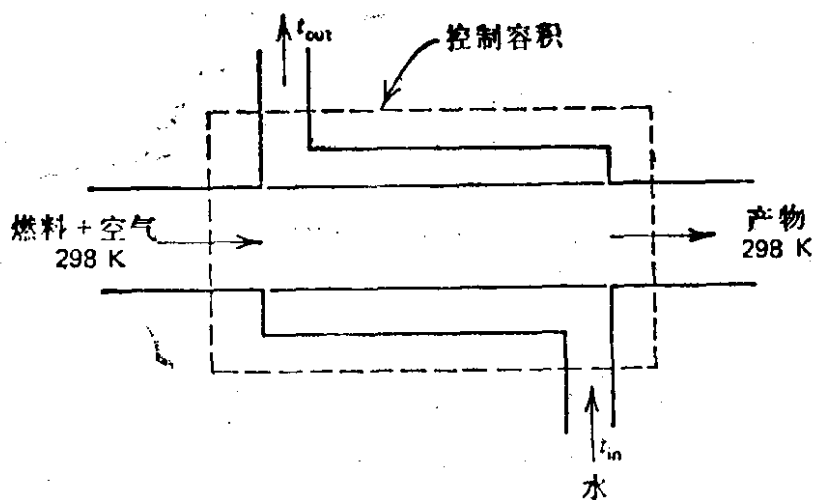


图 1.1 稳定流动热量计

$$H_r(298) + H_w(t_{in}) = H_p(298) + H_w(t_{out}) \quad (1-1)$$

式中下标 r, p 和 w 分别表示反应物，反应产物和冷却水。根据定义， H_{rp} 是附加能量，所以

$$H_{rp} = M_w c_w (t_{in} - t_{out}) \quad (1-2)$$

式中 M_w 是当燃烧单位质量的燃料时，通过水套的冷却水的质量。显然， H_{rp} 是负值，因为 t_{in} 将比 t_{out} 小。方程(1-2)给出了反应热的计算方法，可以写成下面的形式：

$$H_{rp} = H_p(298) - H_r(298) \quad (1-3)$$

它就是 $H_{r,p}$ 的热力学定义，或是 $H_{r,p}$ 的热力学当量。

必须注意的特点是反应混合物包含了过量空气，而不是化学标准量氧。使用那种方法测量有三个原因。第一，没有氧时的空气是有用的。第二，燃料/氧的化学标准混合物将熔化设备。第三，过量氧被用来保证燃料中的碳完全燃烧成 CO_2 ，以及燃料中的氢完全燃烧成 H_2O 。由于反应物与产物气体混合气以同一温度进入和离开测量设备，包括在方程(1-3)中右边项中的过量氧和氮将被消去，这就相当于对燃料/氧化学标准混合物已测定了反应热。

例如，假如丙烷完全燃烧掉，用 x 表示过量氧的摩尔，那么方程(1-3)右边两项为

$$H_r(298) = [h_{\text{C}_3\text{H}_8} + (5+x)h_{\text{O}_2} + 3.76(5+x)h_{\text{N}_2}]_{298}$$

$$H_p(298) = [3h_{\text{CO}_2} + 4h_{\text{H}_2\text{O}} + xh_{\text{O}_2} + 3.76(5+x)h_{\text{N}_2}]_{298}$$

因而，对于丙烷

$$H_{r,p}(298) = [3h_{\text{CO}_2} + 4h_{\text{H}_2\text{O}} - h_{\text{C}_3\text{H}_8} - 5h_{\text{O}_2}]_{298} \quad (1-4)$$

方程(1-4)包括了所有能想象到的 C_3H_8 燃烧构成的基本特征。

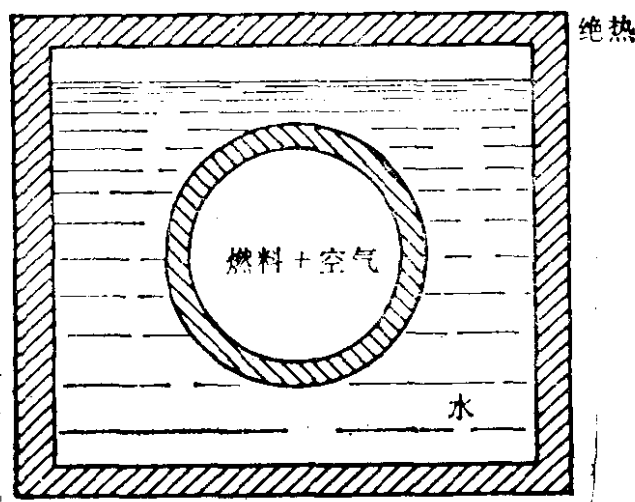


图 1.2 一次装料热量计

定容反应热 $U_{r,p}$ 用图1.2所示的一次装料热量计测量。被测燃料量与过量空气一道导入一个坚固的容器中，这种容器的结构能承受随着燃烧产生的高压而不变形（如果有变形，燃烧产物

将对容器做功，即将记录错误的结果)。容器放在一个大的水池中，其中盛有温度为室温的水，使容器放一段时间以保证温度平衡和燃料与氧充分地混合。然后，燃料/空气混合物点火，热量传递给水 and 容器壁。整个系统与外界绝热，在某个温度 T' 值时达到温度平衡，并进行精确的计算，确定系统温度下降到初始温度时必须传递出去的热量。根据以上分析的情况得出与求 U_{rp} 的方程 (1-3) 相应的方程是

$$U_{rp}(298) = U_p(298) - U_r(298) \quad (1-5)$$

按照热力学定义的 U_{rp} ，对于丙烷的情况，

$$U_{rp} = [3u_{\text{CO}_2} + 4u_{\text{H}_2\text{O}} - u_{\text{C}_3\text{H}_8} - 5u_{\text{O}_2}]_{298} \quad (1-6)$$

如果知道 H_{rp} ，我们就能计算出 U_{rp} ，或者反过来。从方程 (1-3) 减出方程 (1-5) 时，则有

$$H_{rp} - U_{rp} = (H_p - U_p) - (H_r - U_r)$$

取消温度下标，它总是明确为 298K。对于气体

$$h - u = RT$$

式中 R 是通用气体常数，因为焓 h 和内能 u 的单位是每摩尔。对于液体，

$$h - u \approx 0$$

定压反应热与定容反应热之差可以写成

$$H_{rp} - U_{rp} = (N_p - N_r)RT$$

当 $R = 8.314 \text{ kJ/kmol}$ 时

$$H_{rp} - U_{rp} = 2480(N_p - N_r) \quad (1-7)$$

式中 N_p 与 N_r 分别表示化学标准量的燃料/氧气态混合物的燃烧产物和反应混合物的摩尔数。仍以丙烷为例，根据附录 E 表 E.4，

$$H_{rp} = -2032800 \text{ kJ/kmol 丙烷}$$

对于气态丙烷和燃烧产物中为气态 H_2O ，则有

$$\begin{aligned} U_{rp} &= -2032800 - (7 - 6) \times 2480 \\ &= -2035300 \text{ kJ/kmol 丙烷} \end{aligned}$$

其变化小于1%。

表E.4中, 两个 $H_{r,p}$ 表示液态和气态燃料, 在这两种物态中水都为气态。两者不相同的是丙烷在298K的汽化热。也就是说,

$$\begin{aligned} h_{fg} &= 2032800 - 2016900 \\ &= 15900 \text{ kJ/kmol丙烷} \end{aligned}$$

由于燃烧产物中水的凝结对 $H_{r,p}$ 和 $U_{r,p}$ 值的影响可能是明显的, 如果

$H_{r,p}$ ——定压反应热, 气态水,

$H'_{r,p}$ ——定压反应热, 液态水,

那么

$$H_{r,p} - H'_{r,p} = N_{\text{H}_2\text{O}} \times h_{fg}(\text{H}_2\text{O}) \quad (1-8)$$

对于丙烷, 当 $h_{fg}(\text{H}_2\text{O}) = 43956 \text{ kJ/kmol}$ 时,

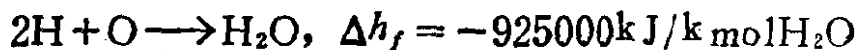
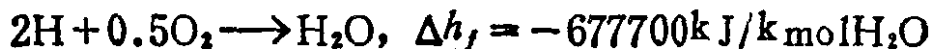
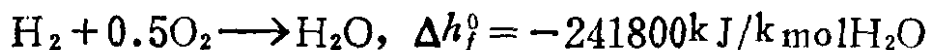
$$H_{r,p} - H'_{r,p} = 4 \times 43956 = 175824 \text{ kJ/kmol丙烷}$$

即

$$H'_{r,p} = -2208600 \text{ kJ/kmol丙烷}$$

变化大于8%。因此, 从出版的表格中选用反应热的数值时, 必须注意燃烧产物中水的物态。常常对于 $H_{r,p}$ 和 $U_{r,p}$, 在气态水的情况下, 加上“低热值”这个术语, 在液态水的情况下, 加上“高热值”这个术语。

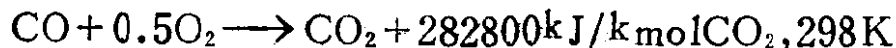
当反应表示从化合物的元素生成化合物时, 反应热就变成了“生成热”。当化合物有一种以上的方法由它的元素生成时, 有出现混淆的可能。例如,



当这些反应发生在298K时, 生成的水为气态。第一个反应式表示水的组成元素在标准状态下生成 H_2O , 也就是说, 氢和氧在室温压下的自然状态 (在这种情况下, 均为气态)。用上标号 $^\circ$ 标志在标准状态下的元素产生的生成热, 并称为标准生成热, 或者

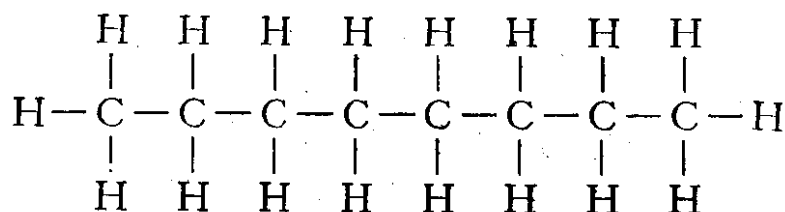
称为标准生成焓。表 E.4 列出了少数几个粉状燃料的数值, 这些值在以后的讨论中可以有作用的。

常常把生成热包括在反应式中, 例如:



这一行按以下的读法: 当在 298 K 进行定温反应时, 一千个摩尔 CO, 和 500 个摩尔 O_2 将产生一千个摩尔 CO_2 和 282800 千焦耳的热量。反应是放热, 则生成热为负值; 如果是定温反应, 能量应该从反应传递出来, 而不是把能量传递给反应。

表 E.4 列出了直链分子烷烃系列的 $H_{r,p}$ 值, n -正辛烷就是一例:



表中的 $H_{r,p}$ 值被分子量除时, 单位就转化成每公斤千焦耳 (kJ/kg), 从甲烷到癸烷, 这个计算结果变化甚小。每单位质量具有不变反应热是烷烃系列的一个特点。

小结

反应热 $H_{r,p}$ 和 $U_{r,p}$ 表示为了使产物回到反应物的初始温度必须加到单位数量燃料的燃烧产物的能量。 $H_{r,p}$ 表示定压燃烧所加的能量, $U_{r,p}$ 表示定容燃烧所加的能量。热力学定义是

$$H_{r,p} = H_p(298) - H_r(298)$$

$$U_{r,p} = U_p(298) - U_r(298)$$

式中 p 和 r 表示产物和反应物。反应物总是可理解为化学标准量燃料/氧的混合物。产物仅包括 CO_2 , 或者 H_2O , 或者两者都有。

在下一章中, 我们研究应用 $H_{r,p}$ 和 $U_{r,p}$ 计算绝热燃烧温度的方法。

思考题

1.1 对于丙烷 C_3H_8 , 计算以下八个状态用 kJ/kmol 和 cal/kg 为单位的反应热:

限制条件		燃料		产物中的 H ₂ O	
定	容	液	态	液	态
定	容	液	态	气	态
定	容	气	态	气	态
定	容	气	态	液	态
定	压	液	态	液	态
定	压	液	态	气	态
定	压	气	态	气	态
定	压	气	态	液	态

1.2 对于烷烃和酒精，燃烧发生在定容情况下比发生在定压情况下要释放更多的能量。

对于气体，或气体混合物，在定压下加热比在定容下加热需要更多的能量。

这两种说法是否矛盾？倘若如此，如何解释？

第二章 绝热火焰温度

2.1 引言

绝热火焰温度的计算实际上每个问题都与燃烧有关。本章讨论它的计算方法。

绝热火焰温度取决于许多因素，主要的因素是：（1）燃料或多种燃料；（2）反应混合物的化学成分；（3）反应混合物的温度；（4）对系统的限制条件；（5）反应混合物的压力。直观上，我们可预料到不同的燃料产生不同的火焰温度，氢/碳原子比是主要参数。同样，可以预料火焰温度随混合物成分变化而变化。例如，混合物中含有过量的燃料或者空气，将产生低的火焰温度。燃料/氧的混合物比含有等量氧的燃料/空气混合物将产生更高的温度；空气中的氮实际上是惰性气体，对燃烧混合物没有影响，仅仅吸收能量。提高反应混合物的温度应增加火焰温度。在定容下燃烧反应物不把功传递给外界，而在定压下燃烧反应物则把功传递给外界。因此，这两种限制系统将产生不同的火焰温度。反应物的压力能影响火焰的温度；这点会在第十章中详细说明。

准确的火焰温度计算法要解复杂的方程组。由于下列两个原因，在这章中的讨论将局限于比较简单的方程组。第一，精确的计算法难以搞清反应过程中产生的物理意义。第二，火焰温度的近似计算法虽然不能说好到能与精确值相比，但常常能得到最佳的估计值。这些对比在十三章中讨论。

温度计算，如果用手算，则用试算法进行，如果用计算机算，则用系统寻找法进行。在此，重点将放在用计算机程序解题的编制上。

2.2 在C/H/N/O系统中的完全燃烧

根据完全燃烧的流程，只要检查反应混合物就能得到产物混合气的成分。对于含有C, H, N和O原子的反应混合物其规律简述如下：

1. 所有的氮以 N_2 形式出现，也就是说，氮是惰性气体。
2. 所有的氢以 H_2O 形式出现。
3. 所有的碳被氧化为CO。如果仍有氧，则部分CO被氧化为 CO_2 。
4. 如果有足够的氧气把全部碳氧化成 CO_2 ，过量的氧气以 O_2 形式出现。

（对含有H, N和O原子的反应混合物，相类似的流程是适用的。这在2.8节中讨论。）

产物混合气的摩尔数现在可认为是一般情况。设MC, MH和MO分别表示在一个摩尔燃料中的碳，氢和氧原子的摩尔数。设YCC表示每摩尔燃料化学标准氧量。则

$$YCC = MC + MH/4 - MO/2 \quad (2-1)$$

设YMIN表示在反应物中每摩尔燃料能允许的最小含氧量，所以

$$\begin{aligned} YMIN &= (MC - MO)/2 + MH/4 \\ &= YCC - MC/2 \end{aligned} \quad (2-2)$$

反应混合物中包括

$$1 \text{ 摩尔燃料} + YO_2 + 3.76YN_2$$

产物的摩尔数为

$$\begin{array}{ll} YMIN \leq Y \leq YCC & Y \geq YCC \\ N(1) = 2(YCC - Y) & N(1) = 0 \\ N(2) = 2(Y - YMIN) & N(2) = MC \\ N(3) = MH/2 & N(3) = MH/2 \\ N(4) = 3.76Y & N(4) = 3.76Y \\ N(5) = 0 & N(5) = Y - YCC \end{array} \quad (2-3)$$

式中采用FORTRAN描述符体系，所以摩尔数与气体之间的对