

第1章 燃烧学基础

1.1 引言

理解航空涡轮发动机燃烧系统所必需的背景知识与理解扩压器、旋转机械或喷管所需的知识截然不同。因此，将燃烧学的基础知识单独拿出来介绍是很有必要的。本章主要针对航空推进系统中的燃烧问题回顾重要的基础概念。

航空推进系统的燃烧问题涵盖非常广泛，本章仅限于相关的重要知识点。本章精选相关知识，原则在于能让读者理解燃烧系统的工作规律、性能参数以及其局限性。而航空发动机燃烧领域的专业读者，可以阅读本章后面列出的参考书目，从而更加深入地理解对应的背景知识。

燃烧学是多学科交叉的科学，其中最重要的3门学科为化学、热力学和气体动力学。这些领域之间的相互关系如图1-1所示，从事燃烧研究的科研人员 and 工程师需要对每个领域都有基本的理解。在每个领域下面都列出了一系列相关的子学科，进一步描述该领域内的主要内容。每一个子学科都会在本章中进行说明。

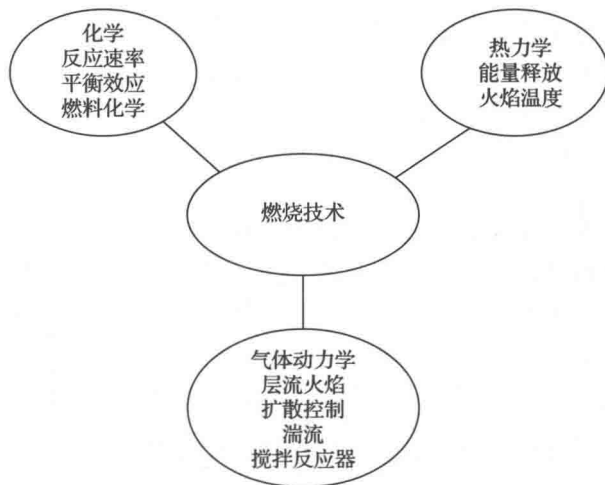


图1-1 燃烧技术的多学科关联属性

本章主要内容分为5个部分。前3部分主要介绍化学、热力学和气体动力学；第4部分讨论对于燃烧室设计者比较重要的相关燃烧参数；最后简要介绍航空燃料的燃烧特性。

1.2 化学

本节介绍 3 个燃烧化学的重要知识点。首先是化学反应速率，这是在所有化学反应动力学中都非常重要的基础概念。影响反应速率的热力学条件，特别是温度，会一一讨论。第 2 部分内容是关于化学平衡，这部分内容在理解以及分析高温燃烧系统中具有重要意义。最后综述实际使用的碳氢燃料的基本燃烧化学特性。理解 H_2O 和 CO_2 产生的化学反应的顺次过程，从而可以理解很多实际燃烧特性的原因。

1.2.1 反应速率

质量作用定律是化学动力学中最基本的概念之一，它将反应速率（或者说反应物浓度随时间的变化率）与参加反应的各反应物浓度建立关系。以下面的通用化学反应表达式为例



在这个例子中， a mol 的反应物 A 与 b mol 的反应物 B 反应生成 c mol 的生成物 C 和 d mol 的生产物 D。在此原子平衡方程中的反应物化学恰当比系数（ a 和 b ）也被称为反应分子数。质量作用定律表示化学反应速率一般和反应物浓度与各自的化学计量数乘积成正比。在这个例子中，正向反应速率 r_f 的表达式为

$$r_f = k_f [A]^a [B]^b \quad (1-2)$$

其中，方括号代表某组分的摩尔浓度（摩尔数/体积）， k_f 表示正向反应率系数。

请注意正向反应率 r_f 既可以用反应物 A 和 B 的消耗率来表示，也可以用生成物 C 和 D 的生成率来表示。这 4 个速率之间的关系由化学恰当比系数 $a \sim d$ 决定。例如，如果 r_f 采用 A 的消耗率来表示，则以下关系式是正确的

$$r_f = -\frac{d[A]}{dt} = -\frac{b}{a} \frac{d[B]}{dt} = \frac{c}{a} \frac{d[C]}{dt} = \frac{d}{a} \frac{d[D]}{dt} \quad (1-3)$$

式中： t ——时间。

反应物浓度和质量作用定律之间的相关性是有理论依据的。假设只有在反应物分子发生碰撞之后才会形成生成物，则基于这个假定分析可以得到和式（1-2）相同的浓度关系式。式（1-2）中的速率系数 k_f 在一定程度上影响着分子碰撞理论对反应率的影响。另外， k_f 在反应速率中所占的比例由分子量级的变化和分子碰撞决定。

对于燃烧体系中许多重要的反应来说， k_f 是温度的强函数。分子碰撞率对温度（ $T^{1/2}$ ）的依赖很小，同时对 k_f 的影响也非常有限。温度主要会对反应物分子产生一个外加的动力，使其能够克服分子间的能障，从而发生化学反应，转化成生成物。物理上认为反应物到生成物之间形成了活化络合物。能障的大小（形成活化络合物所需的能量）一般被叫作活化能 E_a 。并不是所有的反应物分子之间的碰撞都会产生足够的能量，只有一小部分碰撞会成功地形成活化络合物。分子能量分布可以用玻耳兹曼（Boltzmann）统计法来得到，则成功发生反应所占比例可以通过 $\exp(-E_a/RT)$ 计算得到，这里 R 是通用气体常数，下标 af 表示正向反应。

反应物分子在发生碰撞时的几何偏差同样可以阻碍生成物的形成；只有适当的方位

下一部分具有足够能量的碰撞才会产生反应。考虑在分析反应速率系数时，位阻因子是最重要的影响因素。这个因素可以认为是对分子成功发生反应所必需的几何排列特性而产生的碰撞效率低下的修正。

结合式(1-2)中的反应速率系数，可以得到一个重要的反应速率表达式。式(1-1)中的通用正向化学反应速率表达式为

$$r_f = -\frac{d[A]}{dt} = [A]^a[B]^b C_f(T)^{\frac{1}{2}} \exp(-E_{af}/RT) \quad (1-4)$$

其中， C_f 包括位阻因子以及将碰撞率换算成反应率时所需要的系数。阿累尼乌斯(Arrhenius)首次指出了温度与反应率的指数关系。将指前因子中的温度去掉(即去掉 $T^{\frac{1}{2}}$)，则式(1-4)被称为阿累尼乌斯方程。而式(1-4)本身是一个改进的阿累尼乌斯模型。

需要说明的是，只有当上述的化学计量式可以表示整个生成物产生过程时，式(1-4)才是正确的。而真实的碳氢燃料的燃烧，在生成诸如 CO_2 和 H_2O 这类最终产物之前还包括许多复杂的化学反应中间步，这点会在1.4节中介绍。假如化学计量式不能准确地表达整个反应过程，反应物浓度与反应率之间可能就不是反应分子数的关系，可能出现分数反应级数。但是，式(1-4)对于复杂化学反应中的每个单步反应都是适用的。

1.2.2 化学平衡

式(1-1)所描述的化学反应中，各组分浓度随时间的变化如图1-2所示。当生成物C和D的浓度占主要地位时，逆向化学反应(或称为逆反应，即生成物向反应物转换)会变得越来越重要。逆向反应的速率 r_b 可以通过和正向反应相同的方式分析出来，如下所示。

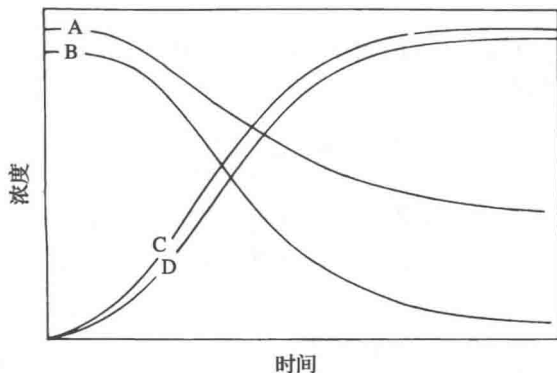


图1-2 一个化学反应过程中的浓度变化

$$r_b = k_b [C]^c [D]^d \quad (1-5)$$

为了同时表达出正向反应和逆向反应，式(1-1)所述的化学系统用以下化学式来表达更加准确



由于逆向反应总是在一定程度上存在，A和B的浓度最终会减小到一定程度，但不

会减到零, 此时正向反应和逆向反应的速率相等。这些平衡状态的浓度在图 1-2 上反映为各物质的渐近线。注意, 图 1-2 还说明在普通情况下, 各反应物浓度并不等于准确的化学计量比, 反应物 A 的浓度就高出了很多。

平衡浓度可以通过式 (1-2) 和式 (1-5) 计算得到。在平衡状态下, 反应物的消耗率 (见式 (1-2)) 和反应物的生成率 (见式 (1-5)) 完全相等。因此, 平衡条件是 $r_f = r_b$, 或者说

$$k_f[A]^a[B]^b = k_b[C]^c[D]^d \quad (1-7)$$

将上式重新排列, 可得

$$\frac{k_f}{k_b} = \frac{[C]^c[D]^d}{[A]^a[B]^b} \quad (1-8)$$

由于 k_f 和 k_b 仅是温度的函数, 通过式 (1-8) 可以方便地求出平衡状态时的混合物流温度。 k_f/k_b 被定义为基于浓度的平衡常数 K_c , 另一种基于摩尔分数的平衡常数 K_x 同样也可以用这种方法定义。

另一种更加常见的形式是基于分压的平衡常数 K_p 。分压是指将总的混合物压力设想为各个组分分压力之和。各组分的摩尔质量决定了各自的分压占总压的比例。根据分压的定义, 平衡常数为

$$K_p = \frac{(p_C)^c(p_D)^d}{(p_A)^a(p_B)^b} \quad (1-9)$$

其中, p_A , p_B , p_C 和 p_D 分别为各组分的分压。习惯上, 在化学平衡计算中, 这些压力一般用大气压的相对压力来表达。

K_c 和 K_p 都仅仅是温度的函数。从式 (1-4) 和式 (1-7) 可以推导出温度的关系式

$$[A]^a[B]^b C_f T^{\frac{1}{2}} \exp(-E_{af}/RT) = [C]^c[D]^d C_b T^{\frac{1}{2}} \exp(-E_{ab}/RT) \quad (1-10)$$

式 (1-10) 可以简化为

$$K_c \text{ 或 } K_p \approx \exp\left(\frac{E_{ab} - E_{af}}{RT}\right) \quad (1-11)$$

从式 (1-11) 可以看到, 平衡常数与温度呈指数关系, 受温度的影响很大。

在碳氢化合物/空气的燃烧系统中, 存在两个最重要的平衡关系: CO_2 和 H_2O 的分解



这些平衡关系可以通过水—气反应关系式进行数学上的简化



需要注意的是, 这不是第 3 个独立关系式, 这只是式 (1-12) 和式 (1-13) 的线性组合。图 1-3 (使用了参考文献 [1] 中的数据) 中给出了这 3 个反应的分压平衡常数, 可以发现水—气反应的平衡常数对温度不敏感。

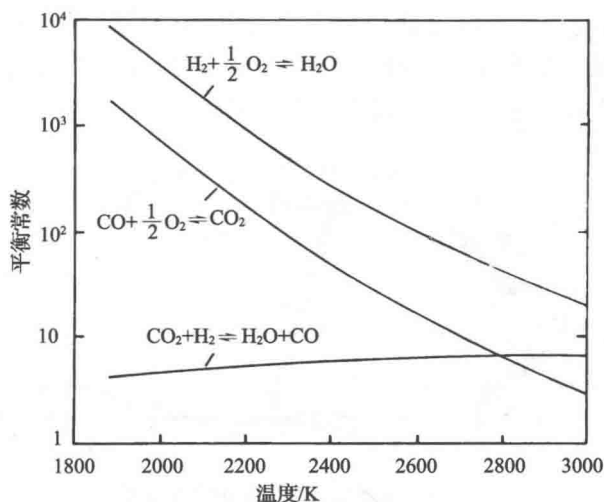
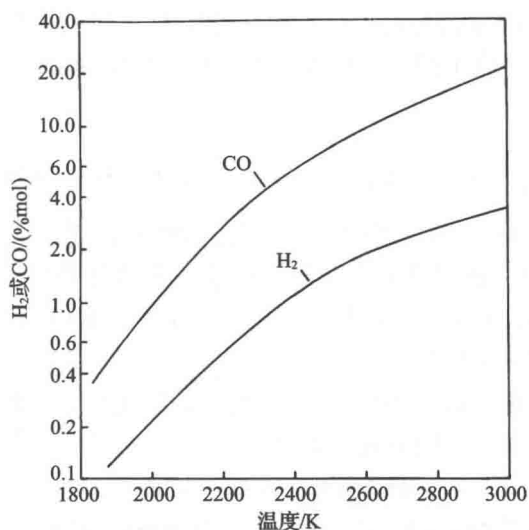


图 1-3 重要离解反应的平衡常数

在碳氢燃料转换成 CO_2 和 H_2O 时会释放出大量的化学能，而生成物的离解会消耗一部分能量。1.3 节会介绍到平衡状态火焰温度受到生成物离解的强烈影响。由于平衡常数对温度的敏感性，离解现象在高温火焰中更加显著。图 1-4 给出了混合物温度对离解的影响，所使用的化学反应为 C_nH_{2n} 燃料与空气在 $1\text{atm}^{①}$ 下的化学恰当比燃烧。混合物温度对燃烧生成物中 CO 和 H_2 浓度的影响非常显著。

图 1-4 平衡状态 CO 和 H_2 浓度与温度的关系

1.2.3 碳氢燃料化学动力学

在碳氢燃料燃烧过程中，会发生一系列复杂的化学反应，至今还没有完全理解其中的细节。碳氢化合物燃烧化学动力学主要包括烃的热解和部分氧化生成 H_2 和 CO ，分支

① $1\text{atm} = 101.325\text{kPa}$ 。——译者注

链反应导致 H_2 的消耗, 以及链支化过程中自由基的生成使得 CO 发生氧化反应。图 1-5 中列出了每个反应的步骤。需要注意的是, 这些反应是根据化学发应过程中的质量的流动过程来排列的。每一个反应过程都将在下面介绍。

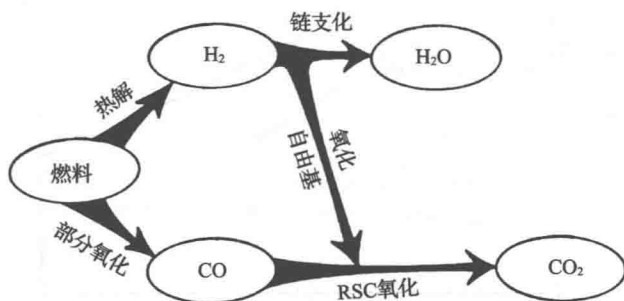


图 1-5 碳氢化合物燃烧的化学原理

热解指的是燃料分子在极高的温度以及部分氧化的作用下分解成较小的碎片。这个分子分解的过程发生在燃烧的第一阶段, 主要会产生 H_2 和 CO。关于实际碳氢燃料在这个过程中的详细资料非常少, 尤其是摩尔质量为 $50 \sim 200 \text{ kg/mol}$ 的大分子量碳氢燃料。普遍认为燃料的烃结构以及它的热解特性都会对燃烧过程产生影响。例如, 氢含量较低的碳氢燃料会在燃烧初始阶段产生更多的碳粒子。

埃德尔曼 (Edelman)^[2] 提出了一种单步模拟全局模型来量化实际碳氢燃料的热解和部分氧化。他所采用的方法是通过一个单步化学反应, 描述众多的会生成 H_2 和 CO 的复杂化学反应机理。他将不同温度和压力下燃料和氧气浓度的试验数据拟合成了一个阿累尼乌斯表达式

$$-\frac{d[C_nH_m]}{dt} = \frac{5.52 \times 10^8 T}{p^{0.825}} [C_nH_m]^{\frac{1}{2}} [O_2] \exp(-24400/RT) \quad (1-15)$$

这里浓度的单位是 mol/cm^3 , T 的单位是 K, p 的单位是 atm。24400 是活化能, 单位是 $\text{cal}^{①}/(\text{g} \cdot \text{mol} \cdot \text{K})$ 。虽然这个公式已被证明在某些燃烧模型中很有用, 但是该公式需要给定不同碳氢燃料的化学反应机理以及混合物的热解机制。另外, 燃料的热解和碳粒子的形成也需要进一步研究。

热解产物是还原态化合物 (RSC)。这些组分的氧化比它们的形成更好理解。还原态化合物的重要氧化反应可以用下面的通用方程来表示



这里 RSC 表示还原态化合物, OR 表示氧化基, OSC 表示氧化态化合物, RR 表示还原基。RSC 的氧化速率可以通过阿累尼乌斯表达式来求出。

虽然式 (1-6) 所描述的自然反应在热解过程中影响 H_2 的消耗, 但是, 碳氢燃烧的很多特征因素都是其他化学反应所造成的, 如支链反应。这种化学反应包括了反应过程中额外的组分基团的生成。在 H_2 的氧化过程中, 重要的支链反应有

① $1 \text{ cal} \approx 4.1868 \text{ J}$ 。——译者注



在这两个反应过程中，一个单自由基（O 或者 H）最终会生成两个自由基（H + OH 或 OH + O）。这类反应可能会产生大量的自由基。在燃烧区域存在高浓度的 H_2 ，自由基的含量远远超过平均状态。在这个过程中，OH 自由基同样也参与 RSC 反应（见式（1-6）），将 H_2 转化成 H_2O 。

一氧化碳的反应过程如下所示



由于式（1-19）所述反应的活化能普遍偏低（只有几千卡每克摩尔），一氧化碳氧化率主要受到 OH 浓度的影响。如前述，这个量受到支链反应的控制。然而，通常在 RSC 化学反应中通过假定当地或者局部的化学平衡状态来得到自由基的浓度。这种方法已经被霍华德（Howard）^[3] 应用在 CO 氧化反应的研究中。由于平衡状态 OH 的浓度和温度之间呈指数关系，所以可以利用一个类似 Arrhenius 公式来表示一个存在 H_2O 的 $\text{O}_2 + \text{CO}$ 反应。Howard 定义

$$-\frac{d[\text{CO}]}{dt} = k_0[\text{CO}][\text{O}_2]^{\frac{1}{2}}[\text{H}_2\text{O}]^{\frac{1}{2}}e^{-32000/RT} \quad (1-20)$$

其中， $k_0 = \text{const} = 1.3 \times 10^{14} \text{ cm}^3/(\text{mol} \cdot \text{s})$ 。这个假设与反应式（1-7）和式（1-18）可能生成高于平衡状态的自由基这一说法不矛盾。CO 的氧化速率远小于 H_2 的消耗率，同时在一个非循环的系统中，CO 的氧化反应主要发生在 H_2 反应基本完成后。然而，燃气涡轮发动机的燃烧系统是一个循环过程，所以这个假设可能在发动机的燃烧计算中产生错误结果。

通过上述 RSC 反应生成的 H_2O ，特别是 CO_2 ，会释放大量的能量。所以，CO 的消耗率和主要能量释放率有着极强的相关性。经验告诉我们，燃烧特性（如火焰传播）受到主要热量释放过程的影响，根据式（1-19）和式（1-20）可以得到它们之间的关系。另一方面，那些受到燃料破碎/热解影响的特性（点火延迟）则可以通过式（1-15）更好地得到相互间的关系。

上述讨论仅仅是对复杂碳氢化合物燃烧化学机理的简单介绍。而进一步详细的内容最近已经开始着手研究，用于预测燃烧系统中污染物的排放。表 1-1 是参考文献 [4] 中的一个更加复杂的反应机理。

表 1-1 碳氢化合物的氧化机理^[4]

1	$\text{C}_8\text{H}_{16} + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{C}_4\text{H}_8\text{O}$	8	$\text{C}_2\text{H}_4 + \text{OH} \rightarrow \text{CH}_3 + \text{H}_2\text{CO}$
2	$\text{C}_4\text{H}_8\text{O} + \text{O}_2 \rightarrow \text{HO}_2 + \text{CO} + \text{CH}_3 + \text{C}_2\text{H}_4$	9	$\text{CH}_3 + \text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + \text{H}$
3	$\text{C}_8\text{H}_{16} + \text{OH} \rightarrow \text{H}_2\text{CO} + \text{CH}_3 + 3\text{C}_2\text{H}_4$	10	$\text{C}_2\text{H}_4 \rightarrow \text{C}_2\text{H}_2 + \text{H}_2$
4	$\text{CH}_3 + \text{O} \rightarrow \text{H}_2\text{CO} + \text{H}$	11	$\text{C}_2\text{H}_2 + \text{OH} \rightarrow \text{CH}_3 + \text{CO}$
5	$\text{CH}_3 + \text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{CO} + \text{OH}$	12	$2\text{H} + \text{M} \rightarrow \text{H}_2 + \text{M}$
6	$\text{H}_2\text{CO} + \text{OH} \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{CO} + \text{H}$	13	$2\text{O} + \text{M} \rightarrow \text{O}_2 + \text{M}$
7	$\text{C}_2\text{H}_4 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{CO}$	14	$\text{OH} + \text{H} + \text{M} \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{M}$

表 1-1 (续)

15	$H + O_2 \rightarrow OH + O$	19	$CO + OH \rightarrow CO_2 + H$
16	$O + H_2 \rightarrow OH + H$	20	$HO_2 + M \rightarrow H + O_2 + M$
17	$H + H_2O \rightarrow H_2 + OH$	21	$HO_2 + H \rightarrow 2OH$
18	$O + H_2O \rightarrow 2OH$	—	—

1.3 热力学

本节介绍燃烧系统中影响化学能释放的重要的热力学知识。1.3.1 节重点解释热力学第一定律的应用，并介绍了一个简单的计算火焰温度的方法。1.3.2 节介绍燃料/空气射流燃烧中影响火焰温度的重要因素。

1.3.1 能量释放和火焰温度

热力学第一定律（能量守恒定律）对于任何燃烧系统来说都是一个非常重要的因素。由于可以将燃气涡轮发动机的主燃烧室和加力燃烧室看成一个绝热、等压的燃烧系统，因此可以采用总焓法来进行分析。这种情况下，总焓包括显焓、化学能和运动能的影响

$$h_t = h_s + \left(\frac{f/a}{f/a + 1}\right)\Psi + \frac{u^2}{2J}$$

(1 - 21)

式中： h_t ——总焓，kcal/kg；
 h_s ——显焓，kcal/kg；
 f/a ——燃料与空气质量的比值；
 Ψ ——化学能，kcal/kg；
 u ——流速，m/s；
 J ——热功当量，为 4186J/kcal。

一般用标准生成焓来定义一个燃烧过程中释放的化学能。标准生成焓 h_f 代表了定压生成的必要能量增量或者由元素在 25℃ 自然状态下生成化合物的能量。任何化学反应需要的能量都可以用反应物的生成焓之和减去生成物的生成焓之和来计算

$$(\Delta h_r)_{25^\circ C} = \sum x_i (h_f)_i - \sum x_j (h_f)_j$$

(1 - 22)

式中： Δh_r ——25℃ 时的反应焓；
 x_i ——生成物组分的化学当量数；
 x_j ——反应物组分的化学当量数。

如果将式（1-22）应用到一个复杂碳氢化合物的氧化过程中，燃料中所有的氢元素都转化为 H_2O ，并且所有的碳元素都转化为 CO_2 ，那么就可以计算得到燃烧热 Δh_c 。需要注意的是，这个结果一般都会有一个很大的负偏差（真实的反应会释放更多的热量）。

完成一个反应所需要的热能 Δh_r 是反应温度的函数。从 25℃ 升高到 T_1 温度所需要的热能是

$$(\Delta h_r)_{T_1} - (\Delta h_r)_{25^\circ C} = (h_{sp} - h_{sr})_{T_1} - (h_{sp} - h_{sr})_{25^\circ C}$$

(1 - 23)

其中， h_{sp} 和 h_{sr} 分别是生成物和反应物的显焓。随着温度的升高，燃烧热也随之增大

(释放的能量减少)。

除了加力燃烧室,燃气涡轮发动机燃烧系统中化学动力学对总焓的影响相对较小。在这种情况下,燃烧所释放的能量和火焰温度的关系为

$$-(\Delta h_c)_{T_1} = (h_{sp})_{T_2} - (h_{sp})_{T_1} = \int_{T_1}^{T_2} c_p dT \quad (1-24)$$

其中, c_p 表示燃烧产物的比定压热容,在 T_1 温度下的燃烧热可以利用式 (1-23) 来计算。在火焰温度的计算中,在 T_1 温度时燃烧所释放的热量可以假设为一个能量源项,将燃烧生成物从 T_1 温度定压加热到 T_2 温度。

式 (1-21) 中的 Ψ 项是一个与温度无关的量,代表燃料化学能。可以根据式 (1-25) 来计算

$$\Psi = (-\Delta h_c)_{25^\circ\text{C}} + (h_{sp} - h_{sr})_{25^\circ\text{C}} \quad (1-25)$$

利用式 (1-21) 中化学能的概念可以得到计算火焰温度的第二种方法。在化学动力学影响可以忽略不计的情况下,通过总焓守恒可以得到

$$(h_{sr})_{T_1} + \left(\frac{f/a}{1+f/a} \right) \Psi = (h_{sp})_{T_2} \quad (1-26)$$

可以发现式 (1-25) 和式 (1-26) 与式 (1-23) 和式 (1-24) 的结果是相同的。

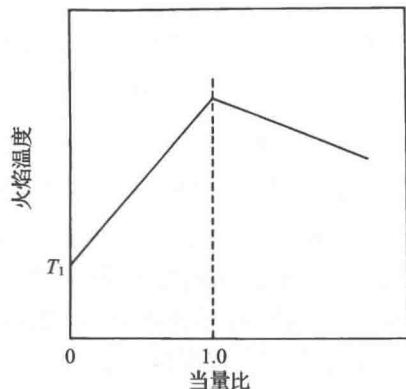
当碳氢燃料完全反应转化为 CO_2 和 H_2O 的情况下,会释放出最大的能量,所以此时火焰温度最高。需要注意的是,这种情况只会发生在贫油燃烧(氧气含量大于化学恰当比)中。在富油燃烧中通常假定生成物有 H_2O 、 CO_2 和 CO ,其中 H_2 转化成 H_2O 的速率比 CO 的氧化速率要快得多(见 1.2 节)。一般将完全燃烧所能达到的温度定义为理论火焰温度。由于燃烧的不完全、能量的损失以及 CO_2 和 H_2O 热解的影响,真实的燃烧系统永远无法达到理论火焰温度。然而,这个简单的火焰温度的概念却揭示了热力学第一定律的重要趋势。

式 (1-24) 和式 (1-26) 将燃烧过程中的温升和热量的释放联系在一起。如果给定能量释放的量,那么火焰温度会随着初始温度的增加而上升。同时,因为贫油燃烧中热量的释放量与混合物中燃料的质量是呈正比的,这意味着 T_2 的增量与油气比的升高直接相关。不过,当油气比超过化学恰当比后,生成物中会产生 CO (可能还会有 H_2 和未燃烧的燃料),这将导致火焰温度逐渐降低。由此可见,在化学恰当比时,火焰的温度最高。火焰温度的变化趋势如图 1-6 所示。在这张图中横坐标采用当量比而非油气比。当量比指的是实际油气比除以化学恰当油气比

$$\phi = (f/a)/(f/a)_{\text{化学恰当}} \quad (1-27)$$

当 ϕ 的值小于 1 时,为贫油状态;大于 1 时,为富油状态。

要准确计算火焰温度需要考虑离解作用和比热容,最少需要联立求解 4 个方程组:①化学计量方程(质量守恒和原子守恒);②能量守恒方程;图 1-6 理论火焰温度随当量比的变化



③CO₂的热解方程；④H₂O的热解方程。

还可能增加一些平衡关系式来提高预报准确度，以及预报 NO、NO₂、O、H、OH、N 等组分的浓度。为了减小计算量，通常可以利用水/燃料的平衡方程来代替③或者④（见 1.2 节）。

求解这些方程组有一系列方法。其中一个方法是假定一个火焰温度，同时利用平衡关系式来计算各组分的浓度。之后检查计算值是否满足能量方程的平衡。通过反复地迭代从而最终得到一个满足能量方程守恒的火焰温度。

目前利用上述方法已经建立了一系列详细的表格和电脑计算程序，用于简化燃烧研究者的工作。在参考文献 [5] 中有一些早期的查表计算，而参考文献 [6] 介绍了目前最流行的电脑计算程序。

1.3.2 重要的火焰温度影响因素

本小节介绍在涡轮发动机的实际燃烧中的火焰温度的计算。重要的变量包括油气比、初始压力、温度以及混合物中惰性气体的浓度。

图 1-6 所示的定压绝热火焰温度和当量比的关系在考虑离解作用和比热容的变化时会有显著的改变。图 1-7 为 Jet-A 燃料与空气在 800K 和 25atm（现代发动机在 100% 工况时的典型燃烧室进口条件）下的燃烧情况。当当量比接近化学恰当比时，高温条件下 CO 和 H₂ 的存在是造成理论火焰温度和实际火焰温度的不同关键因素（见图 1-4）。另外，注意到离解现象会使得温度的峰值出现在偏富油的一侧。

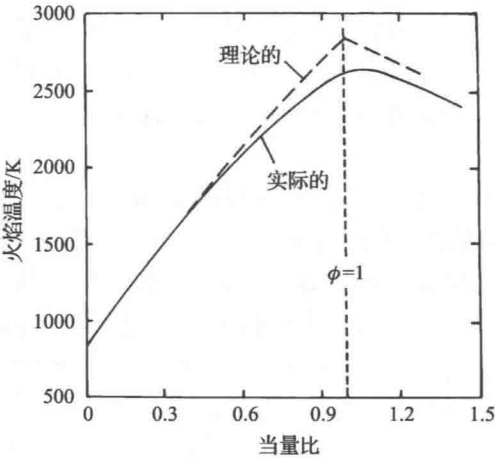


图 1-7 绝热火焰温度受当量比的影响

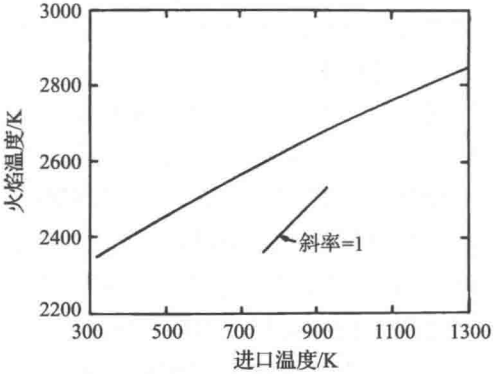


图 1-8 理论火焰温度受进口温度的影响

了解初始压力和温度对火焰温度的影响对于从事燃烧相关的工程师来说十分重要，因为试验研究通常都在等比例相似工况下进行。图 1-8 为 Jet-A 燃料在 25atm 下的理论火焰温度和进口温度之间的关系。注意在这个图中，火焰温度的增量只有进口温度增量的一半。这一现象的原因很大程度上是由于火焰温度受 CO₂ 和 H₂O 离解的影响。图 1-9 为压力对火焰温度的影响。在温度不变的情况下，压力的增加同样会导致火焰温度的增加。这二者的相关性可以通过求解 H₂O 和 CO₂ 离解方程来解释。在这两个例子中，离解都会造成生成物总摩尔数的上升。而如式 (1-8) 和式 (1-9) 所述的平衡过

程,会导致压力的上升,从而造成生成物总摩尔数降低,离解现象减少。燃烧产物中 H_2O 和 CO_2 含量的上升会导致火焰温度也随之升高。

主燃烧室出口温度的计算较前面所说的内容要相对简单一些。绝大部分参数都只在火焰面处达到最大值。由于主燃烧室出口温度普遍低于 1750K,进口温度和压力几乎不会产生离解现象。图 1-10 是油气比和燃烧室出口总温之间的关系,这在火焰温度低于 1750K 时任何进口压力都是适用的。

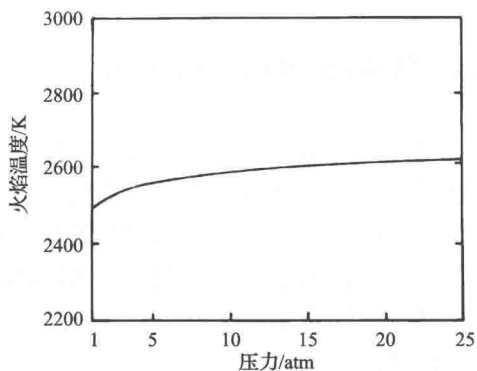


图 1-9 理论火焰温度受压力的影响

氧气浓度是一个影响火焰温度的重要因素。下面这两个氧气浓度低于空气的实际情况对于燃烧研究者来说十分重要。在实际的工作中,一个燃气轮机发动机的主燃烧室进口空气的氧气含量大约在 21% (已经在压气机中完成预加热),然而在试验工作中,进口空气通常并不是纯净的空气 (这是由于通常采用预燃烧的方式对进口空气加热,使其温度达到试验要求,而一般不会使用压缩空气或热交换器直接加热的方式)。另一种情况就是加力燃烧室了。在加力燃烧室中,涡轮会消耗一部分压气机和主燃烧室产生的能量。因此,主燃烧室中化学恰当比区域的火焰温度显然要远高于加力燃烧室中可能达到的最高温度。

考虑氧化效应是估算火焰温度的一个重要方法。较差的燃烧环境一般有着很高的 H_2O 和 CO_2 的浓度,而 O_2 的浓度很低。这会造成每单位质量的混合气中可燃气的比例下降,而根据式 (1-24) 和式 (1-26),火焰温度也会相应降低。图 1-11 是空气中氧气浓度的减小对火焰温度造成的影响。这些计算结果的边界条件是进口温度 900K,进口压力 1atm,且在计算中考虑了离解的作用。

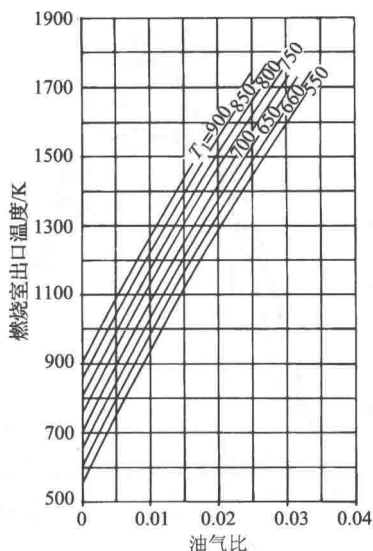


图 1-10 Jet-A 燃料在任意压力条件下燃烧室出口总温 (计算图)

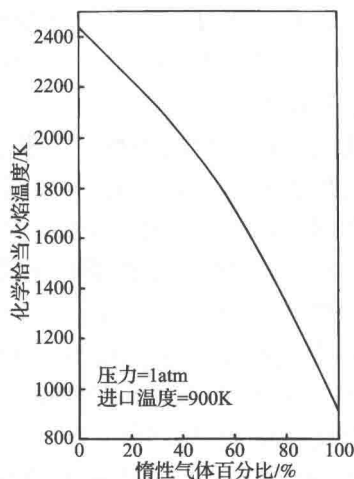


图 1-11 惰性气体对化学恰当比区域的火焰温度的影响

1.4 气体动力学和扩散过程

气体动力学的影响、组分的扩散以及燃烧预热三者都是极其复杂的。要详细考虑这些过程的每个细节是十分困难的，本节将介绍这些现象在涡轮发动机燃烧中的作用因素，同时简要介绍一下利用数值模型模拟这些过程在涡轮发动机燃烧系统中的真实值的方法。内容包括预混层流火焰传播、扩散燃烧、湍流（旧称紊流）效应以及均匀搅拌反应器模型。

1.4.1 预混层流火焰

预混层流燃烧是最简单的燃烧情况。在这种燃烧中，火焰锋面以一个恒定的传播速度穿过燃气和空气的混合气。通过对燃烧过程的质量守恒、动量守恒和能量守恒 3 个控制方程的分析（即兰金 - 雨贡纽（Rankine - Hugoniot）分析），可以得出两种形式的燃烧。第一种，火焰焰锋以超声速向未燃烧可燃气中传播。已燃气体的速度相对于火焰锋面来说既可以是亚声速（爆震燃烧），也可以是超声速（超声速燃烧）。第二种，火焰锋面以亚声速向未燃烧的可燃气中传播。这种情况下根据热力学第二定律，已燃气体的速度必然也是亚声速的。超声速火焰也称为爆燃。

虽然根据 Rankine - Hugoniot 方程可以推导出爆燃的存在以及已燃和未燃气体之间的关系，但是却无法计算出火焰传播速度 S_L 。计算 S_L 需要考虑化学反应速率以及火焰面处的热传导和组分扩散。通过马拉德（Mallard）和勒夏特列（LeChatelier）的基本热力学理论可以推导出下面重要的火焰传播速度与温度的关系式

$$S_L \approx \exp(-E_a/2RT_f)$$

(1 - 28)

这个关系式与式（1 - 4）中化学反应速率与温度的指数关系式非常相似。式（1 - 28）符合图 1 - 12 中火焰传播速度与当量比的经验关系式：当处于化学恰当比时，火焰有着最大的传播速度，此时火焰温度也达到最大值。

涡轮发动机使用的各种碳氢燃料的火焰传播速度没有多大的差异^[8]。实际的航空燃料和图 1 - 12 中描述的燃料的特性非常相似。压力对火焰传播的影响比较复杂。混合物的燃烧速度低于 50cm/s 时， S_L 随着压力的增大而减小。速度在 50 ~ 100cm/s 时， S_L 基本保持不变；高于 100cm/s 时， S_L 随着压力的增大而增大^[8]。

气体的密度会在穿过火焰锋面后出现一个突减。根据质量守恒定律，气体的速度会因此而大幅增大。这会导致在

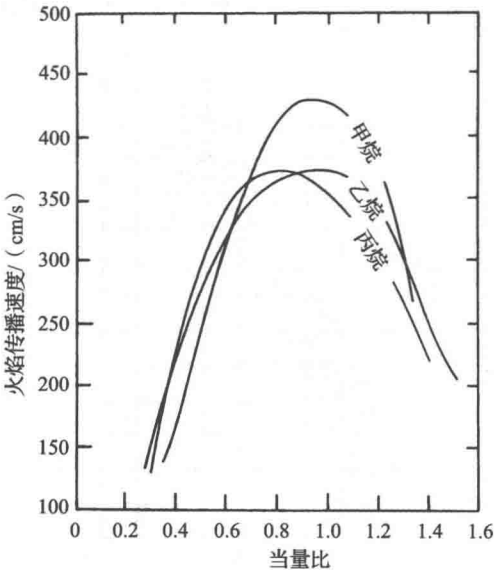


图 1 - 12 不同碳氢燃料在 1atm 与室温下的火焰传播速度

焰峰处压力会有一定程度的损失。降低的压力大小为

$$\frac{\Delta p}{p} = \gamma \left(1 - \frac{T_1}{T_f} \right) \left(\frac{S_L}{c^{\text{①}}} \right)^2 \quad (1-29)$$

式中： γ ——初始气体组分的比热比；

T_1 ——初始温度；

c ——混合物中声音的速度（旧用 a ）。

这个量表示一个燃烧系统为了完成能量释放所能承受的最小的压力下降（通常小于1%）。

通常层流火焰的传播速度不会超过5m/s。而由于现代涡轮增压发动机燃烧系统中的火焰传播速度普遍大于25m/s，因此层流燃烧在发动机中不是主要的燃烧形式。学习其他的燃烧形式十分重要，这其中包括扩散控制燃烧，湍流混合燃烧以及确定区域均匀搅拌反应器模型。

1.4.2 扩散燃烧

在许多实际的设备中，燃料和空气在燃烧之前并不是完全混合的。这些情况下，化学反应发生在氧气和燃料接近化学恰当比的火焰区域。在层流流动中，将燃料和氧气通过分子扩散的原理运动到反应区域，这种形式的燃烧称为扩散燃烧。

最常见的层流扩散燃烧的例子中有蜡烛、煤油灯或是火柴。在这些例子中，燃料和氧气在形成火焰前并没有预先混合。在1928年伯克（Burke）和舒曼（Schumann）^[9]发表的论文中对扩散火焰的性质进行了研究。他们利用类似图1-13（a）所示的燃烧系统进行了试验研究。燃料通过中间的通道进入燃烧区域。在燃烧区域会形成一个层流扩散火焰，火焰形状受燃料的射流速度的影响。

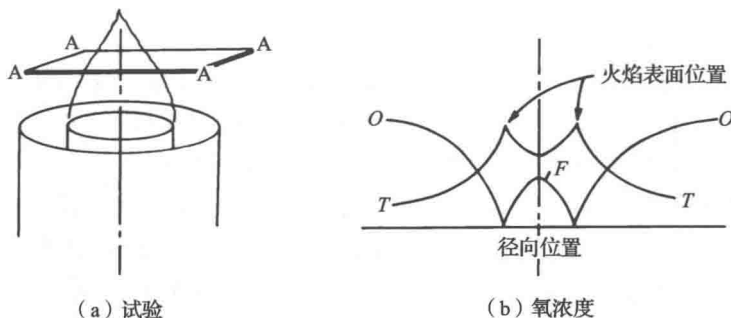


图1-13 扩散火焰的特性

O—燃料浓度；F—温度；T—在A平面变化趋势

Burke 和 Schumann 最先建立了层流扩散火焰的分析方法，至今仍然被广泛应用。他们把燃料和氧气在化学恰当比时的火焰看成一个无限薄的区域。所有的化学反应放热都发生在这一区域的表面上。这一假设相当于认为化学反应速度相对于扩散过程无限快，因此扩散速度控制燃烧速度。由于燃料或者氧气的浓度梯度在火焰面上不可能无限大

① 根据 GB 3102.7—1993 的规定，声速为 c 。——译者注

(这会导致火焰面处的流量无限大), 因此认为二者的浓度在火焰面处均为零。这个浓度和温度的关系如图 1-13 (b) 所示。

是否存在火焰面是预混火焰和扩散火焰的重要区别。预混火焰没有火焰面, 火焰温度主要受混合气压力、温度以及油气比的影响 (见式 (1-28))。然而, 在扩散火焰中, 反应总是发生在处于化学恰当比的火焰面处, 燃烧速率受分子扩散的影响。此外, 火焰温度还跟处于化学恰当比时的定压预混燃烧温度不同。火焰面处的热力学受火焰附近的热传导速率和质量传递速率的强烈影响 (质量和温度的梯度), 不能通过简单的能量平衡来计算火焰温度。

进行更加复杂的分析时, 就不能再应用无限大化学反应速率的简化了。有限反应速率的前提是对火焰分析结果产生的主要重大影响包括: 有限厚度的火焰、火焰处较小的浓度和温度梯度以及更低的火焰焰锋温度。采用更加复杂的分析方法能够得到更加准确的近火焰处参数, 但是对于许多重要的参数, 尤其是燃烧速率, 复杂分析方法和简化方法得到的结果几乎一样。

扩散燃烧的薄火焰理论对于涡轮发动机燃烧系统的燃料液滴燃烧来说十分重要。然而很多研究者怀疑液滴燃烧是否会在高温高压的湍流环境下发生, 这种情况很可能只会出现在发动机起动和空转的工况下。这种情况下, 假定液滴温度已经达到了它的沸点温度, 则液滴周围的火焰向液滴传热使得液滴蒸发。蒸发出的气态燃料向外扩散, 与由外向内扩散的氧气在化学恰当比时发生燃烧反应。这种情况与上文 Burke 和 Schumann 的分析类似, 可以得出以下燃烧速率方程

$$d^2 = d_0^2 - kt \quad (1-30)$$

式中: d ——燃料液滴在 t 时刻的直径;

d_0 —— d 在 $t=0$ 时刻的值;

k ——一个常数。

这个公式被称为哥采夫 (Godsave) 定律^[10], 不同燃料的 k 值不同。决定 k 值时还需考虑对流速度、空气温度以及氧气含量的影响。值得注意的是, 这个关系式同样适用于不发生燃烧时液滴的蒸发现律, 不同之处只在于那时 k 值较小。

前面对燃料液滴燃烧做了一个的简单介绍, 其中假设了每个液滴都是彼此独立的, 燃料是由单相碳氢化合物组成的。而实际的情况远比这个要复杂; 真实的燃料是多组分的混合物, 液滴燃烧与上面所介绍的简单燃烧情况有着明显的不同^[11,12]。研究者需要借助有效的经验关系式对真实情况进行研究。

扩散燃烧同样会出现在燃料液滴已经蒸发但是还没来得及与周边空气混合的情况, 这会形成局部的富油情况, 或者富油区的燃气会与二次流空气发生二次混合。现代燃烧室许多性能参数都与这些重要的过程有关。然而, 在实际燃气涡轮发动机燃烧系统中的扩散燃烧超出经典层流扩散火焰理论的适用范围; 湍流的影响极其重要, 必须考虑湍流扩散性作用。这会在下一小节中进行介绍。

1.4.3 湍流效应

前面对预混燃烧和扩散燃烧的讨论都仅仅限于层流流动。然而, 在实际应用中, 湍流的存在对预混和扩散燃烧都是极其重要的。

湍流会大大增强预混燃烧中的火焰传播速率。本节中的大部分内容都可以帮助进一步理解加力燃烧室中湍流火焰的传播。然而，由于现代低排放燃烧室在主燃区之前设计有一个高湍流度的燃料空气混合蒸发区域，使得湍流火焰传播的相关内容更加重要了。在这个系统中，一个关键因素就是发动机可能发生回火，也就是湍流火焰向上游喷油孔处运动。

勒费布尔（Lefebvre）和里德（Reid）^[13]撰写了大量重要的湍流火焰传播的相关文献。表 1-2 中的关系式已经被认为是具有代表性的湍流影响。影响湍流火焰传播速度 S_T 的重要参数有：

u' ——燃气速度的脉动值；

y ——湍流强度系数；

l ——湍流长度尺度。

一般来说，湍流火焰速度与湍流速度 u' 相关，远远大于 S_L 。

表 1-2 湍流火焰理论^[13]

研究者	关系式	结论
达姆科勒 (Damkohler) ^[14]	$S_T = S_L + u'$ 在高速下，上式近似为 $S_T = u'$	S_T 与湍流尺度无关。在高速下， S_T 只取决于湍流速度
谢尔金 (Shchelkin) ^[15]	$S_T = S_L [1 + (u'/S_L)^2]^{0.5}$ 在高速下，上式近似为 $S_L = u'$	与 Damkohler 结论相同
卡洛维兹 (Karlovitz) 等人 ^[16]	弱湍流时 $S_T = S_L + u'$ 强湍流时 $S_T = S_L + (2S_L u')^{0.5}$ 其中 $u' = \frac{S_L}{\sqrt{3}} \left(\frac{\rho_u}{\rho_b} - 1 \right)$	S_T 与湍流尺度无关。层流火焰速度是最重要的参数
史格拉克（Scurlock）和 格罗弗（Grover） ^[17]	$S_T = S_L [1 + C_3 (\bar{\gamma}/l)^2]^{0.5}$ 其中，$\bar{\gamma}$ 取决于迎面气流和火焰引起的湍流，l 是湍流尺度，C_3 是一个常数	S_T 取决于层流火焰速度和湍流尺度

扩散火焰中，湍流也会导致燃烧速率的增加。对湍流扩散火焰的分析与层流情况类似，但是需要给定一个更高的扩散系数。从物理的角度来说，湍流会使得燃料和空气的

混合效率增加，将一些很小的局部贫油或者局部富油的部分混合在一起。这些小的混气单元被称为旋涡。旋涡扩散，考虑湍流增强火焰前锋处的混合效应，成为分析的修正手段。一般采用经验关系式来处理这一因素。

梅勒（Mellor）^[19]对湍流在实际涡轮发动机燃烧系统中的影响进行了许多试验研究。他使用一个简单的模型来模拟主燃烧室的燃烧，试验中通过钝体火焰稳定器产生的回流区对高湍流度的扩散火焰进行稳定燃烧（见图 1-14）。他成功分析出了从污染物排放到火焰稳定等燃烧参数之间的相关关系。

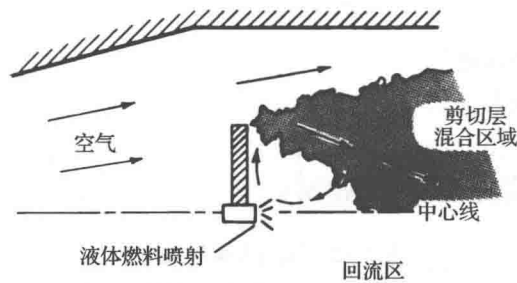


图 1-14 涡轮发动机燃烧系统的简化模型

表 1-3 湍流对化学反应的重要影响—— $(E_a/RT)^{-2}$ 值

$E_a/(\text{kcal}/(\text{g}\cdot\text{mol}))$	T/K		
	1500	2000	2500
10	0.09	0.16	0.25
20	0.0225	0.04	0.0625
40	0.0052	0.01	0.0156
60	0.0025	0.0044	0.00694
80	0.0014	0.0025	0.0039

这里讨论的湍流最重要的一个方面就是它对化学反应的影响。在反应区的燃料与空气混合过程中，每个湍流涡团可能有着巨大的油气比和温度的差别。由于反应速度受这些值的影响很大，湍流的作用会对燃烧速率和最终产物产生极大的影响。古尔丁（Gouldin）^[20]通过分析发现当湍流温度脉动 T' 为式（1-31）的关系时，湍流对化学反应的影响非常重要。

$$(\overline{T'})^2/(\overline{T})^2 > (E_a/RT)^{-2}$$

(1-31)

其中，“ $\overline{}$ ”表示平均值。表 1-3 显示了不同 E_a 和 $\overline{T}$ 时 $(E_a/RT)^{-2}$ 的值。湍流在低活化能（小于 20kcal/（g·mol））和高温（大于 2500K）情况下的影响不明显。由于最终温度或浓度在时间和空间尺度上有明显的区别，这个复杂的现象目前只能通过有限的经验公式来解释。

1.4.4 均匀搅拌反应器模型

均匀搅拌反应器（PSR）的定义是指反应物浓度、生成物浓度以及温度都是完全均

匀的一个燃烧区域^[21,22]。假定燃料空气的混合物在进入反应器后立刻与燃烧生成物混合。原理上,这会造成反应物的温度立刻上升到远高于初始状态的温度,同时持续产生大量的对碳氢燃料燃烧十分重要的链载体(见1.2节)。

PSR 中的单位体积反应速率最大。燃烧室的主燃区和加力燃烧室的回流区的稳定燃烧特征一般都采用 PSR 来模拟。参考文献 [22] 中给出的一个简单的分析如图 1-15 所示。

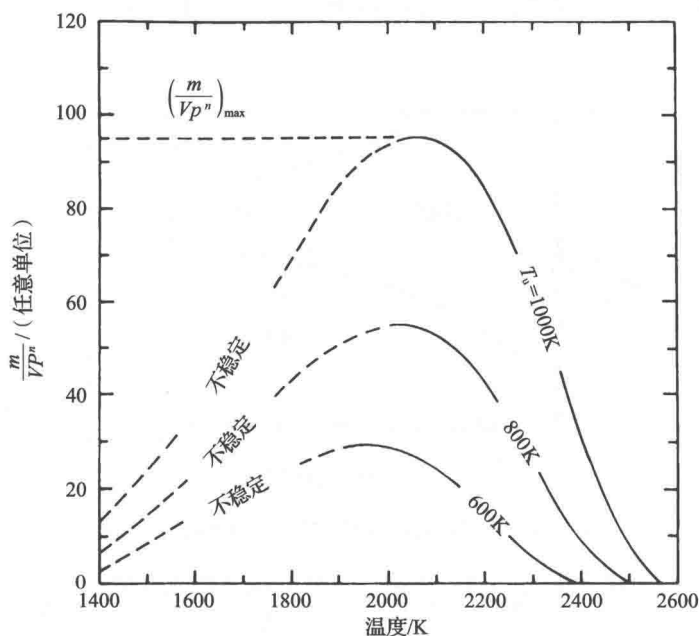


图 1-15 均匀搅拌反应器模型的计算结果

$$\frac{m}{V} \approx \left(\frac{p}{RT_R} \right)^n \frac{(T_F - T_R)^n}{(T_F - T_u)^{n-1} (T_R - T_u)} \exp \left(\frac{-E_a}{R T_R} \right) \quad (1-32)$$

式中: V ——反应器的体积;

m ——反应器中的质量流率;

n ——总反应的阶数;

T_F ——完全燃烧时的绝热火焰温度;

T_R ——PSR 温度;

T_u ——进入反应器的混合物(未燃烧)的初始温度。

图 1-15 给出了质量燃烧速率与燃烧室温度之间的关系。此例中 $n=2$, $E_a=40\text{kcal}/(\text{g} \cdot \text{mol})$, 燃料在化学恰当比燃烧, 当 T_u 等于 1000、800 和 600K 时, T_F 的值分别为 2550、2500 和 2400K。任何 m/Vp 值通过式 (1-32) 可以得到 3 个解——在图 1-15 中只标出了 T_R 的两个最高解, 另一个较低的 T_R 值我们并不关心。只考虑 T_R 最高的那个解, 分析表明一个完全反应的绝热火焰温度只出现在流量速率接近零的时候。另外, 还给出了 m/Vp^n 的最大值, 但是如果进一步增大的话, 火焰可