

亚燃燃烧室稳态工作过程数值研究

黄日鑫¹, 谭永华²

(1 西安航天动力研究所, 陕西 西安 710100; 2 航天推进技术研究院, 陕西 西安 710100)

摘 要: 采用 Fluent 流场计算软件, 对液体亚燃冲压发动机燃烧室的稳态工作过程, 包括点火前的冷流场与点火后的两相反应流场进行数值模拟研究。首先, 通过二维计算, 对比研究两种不同阻塞比燃烧室方案的冷流损失特性与回流区特性, 进行方案初选。随后, 对选型后方案进行两相反应流场计算, 研究燃烧室稳态工作过程的温度场、燃油分布与燃烧效率的一般规律, 比较并选择适合的燃油供应方案; 最后, 对燃烧室进行三维详细结构的建模并计算。计算结果很好地揭示了燃烧室内的流动和燃烧过程, 与试验数据吻合较好。

关键词: 亚燃冲压发动机; 燃烧室; 工作过程; 数值模拟

中图分类号: TK16

文献标识码: A

文章编号: (2009) 02-0018-07

Numerical investigation on working process in a liquid ramjet chamber

Huang Rixin¹, Tan Yonghua²

(1 Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an 710100, China;

2 Academy of Aerospace Propulsion Technology, Xi'an 710100, China)

Abstract: Based on Fluent software, numerical investigation is performed on working process, including non-reacting flow before ignition and two phases reacting flow after ignition, in a liquid ramjet combustion chamber. The inner flow characteristics of two different block-area-ratio schemes are analyzed in total pressure loss and recirculation region distribution. After comparison, the smaller block-area-ratio scheme with good performance is chosen. Then simulation of two phases reacting flow is performed, and temperature field, fuel distribution and combustion efficiency are obtained, which helps to decide a reasonable fuel feeding scheme. At last, the results of three dimensional simulation provide a more particular understanding of flow and combustion process, and simulation results fit the experiment data well.

Key words: ramjet; combustion chamber; working process; numerical simulation

收稿日期: 2008-06-26; 修回日期: 2008-10-10。

作者简介: 黄日鑫 (1982—), 男, 硕士, 研究领域为航空宇航推进理论与工程。

0 引言

燃烧室如何高效地组织燃烧是亚燃冲压发动机研究的核心技术之一。亚燃燃烧室内布置有火焰稳定器等阻塞部件,为流场的研究带来困难。数值模拟计算可以对燃烧室工作过程进行全面细致的研究,帮助选择正确的方案设计,为研制提供比较好的分析资料。另外,在研制过程中,限于试验的测量能力,往往不能对燃烧室工作过程中的内流场特征、燃油在稳定器前后及回流区内的分布以及喷油与燃烧之间的相互影响作细致地观察。特别是试验过程中发生的流场不稳定、火焰摆动、燃烧不均匀以及部件烧蚀等现象和故障,不能很好地从机理上进行解释,给研制改进带来一定的风险。因此,针对亚燃燃烧室工作过程的无化学反应的冷流场与有化学反应的热流场,进行二维与三维相结合的数值研究。

1 研究方法

(1) 选择正确的燃烧模型。液体亚燃冲压发动机内流场的特点,如存在低速回流区等,决定了其流场计算模型应用的特殊性。特别是燃烧过程的计算有别于火箭发动机推力室和内燃机燃烧室的计算,所以模型的选择决定了计算结果的成败。例如在有回流区的流场中使用快速化学反应模型会产生伪燃烧区域,对正确地反映温度场影响极大。本文中,一方面在分析了多种燃烧模型适用性的基础上,选取了涡耗散概念模型进行验证;另一方面在成功得到有意义的数值解的基础上,对燃烧室的工作过程进行细致地分析研究。

(2) 以二维与三维相结合的研究手段,逐步深入地对燃烧室工作过程进行研究。首先,通过二维手段研究燃烧室不同阻塞比方案的冷流损失、回流区特性及来流条件对燃烧室冷流场的影响,得到冷流场的一般规律,比较两种阻塞比方案的优缺点并进行选型。然后,以选型燃烧室为研究对象,模拟计算燃烧室的两相喷雾反应流场,研究燃烧室供油方案等问题。最后,进行冷

流场与两相喷雾反应流场的三维计算,更深入地研究燃烧室工作过程的细节。

2 数值模型

2.1 模型策略与控制方程

在数值模拟计算以前,对燃烧室实际模型进行一定简化。二维、三维计算的简化程度不同,但简化的原则是抓住影响流场特征的主要因素,剔除次要因素,且尽可能多的准确反映燃烧室的工作过程信息,简化模型见文献[4]。在划分网格时,考虑到网格质量、划分网格所要耗费的机时以及工作量的可重复性等问题,将几何形状复杂的计算域划分为非结构四边形网格,其它区域为结构网格。

燃烧室的冷流场为单相气相流场,采用基于标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型的气相湍流 NS 方程组。虽然有文献称 $k-\varepsilon$ 双方程模型在计算时会夸大回流区对火焰传播的影响,而雷诺应力方程模型更精确些,但兼顾计算资源和工作量,认为 $k-\varepsilon$ 双方程模型带来的误差在有限的范围内可以采用。在两相反应流场计算时加入相关的组分方程、离散相液滴运动与状态方程等。两相流问题的处理采用颗粒随机轨道模型,两相间耦合过程通过方程源项完成。雾化过程假设成多组不同滴径液滴的初始分布,该初始分布经测量得到。液滴的蒸发过程假设为静止气氛中的单滴蒸发,蒸发速率由液滴表面的当地饱和蒸汽压计算,液滴温度达到沸点时开始满足沸腾方程。燃烧模型选择基于化学反应动力学的涡耗散概念模型,见文献[3]。

2.2 煤油的反应机理

两相反应计算时,燃油拟选择煤油。煤油的反应机理相当复杂,通常根据煤油混合物的组成以某种烃燃料($C_{12}H_{23}$ 或 $C_{12}H_{24}$)来给出煤油的简化分子式。反应机理的总包反应常为该烃的热解反应,然后再由热解的产物给出一系列的基元反应。化学反应的机理对亚燃冲压发动机燃烧室工作过程的数值研究影响很大,已有的化学反应机理并不是对各种发动机计算普遍适用。在大量数值计算试验的基础上,并考虑计算的方便易行程

度与准确性，归纳提出适用于亚燃燃烧室计算的 1 给出了采用 Chemkin 格式、厘米/克/秒制的机煤油 7 组分 4 步化学反应机理，为方便使用，表 理。

表 1 煤油七组分四步反应机理
Tab.1 Four-step simplified reaction mechanism of kerosene

| | | | | | | | | | |
|-------------------------------|-----------|----|-----|-----|-----|-------------|-----|-----------|-------------|
| ELEMENTS | N | C | H | O | END | ! 反应机理涉及的元素 | | | |
| SPECIES | C12H24 | O2 | CO2 | H2O | H2 | CO | N2 | END | ! 反应机理涉及的组分 |
| REACTIONS | | | | | | | | | |
| ! 正烷烃及其异构体代表的煤油总包热解反应,来自文献[8] | | | | | | | | | |
| C12H24+6O2=> | 12CO+12H2 | | | | | 3.888E+04 | 1.0 | 1.220E+04 | |
| FORD / C12H24 0.5 / | | | | | | | | | |
| FORD / O2 1.0 / | | | | | | | | | |
| DUP | | | | | | | | | |
| ! 环烷烃代表的煤油总包热解反应,来自文献[8] | | | | | | | | | |
| C12H24+6O2=> | 12CO+12H2 | | | | | 2.132E+07 | 1.0 | 1.965E+04 | |
| FORD / C12H24 0.5 / | | | | | | | | | |
| FORD / O2 1.0 / | | | | | | | | | |
| DUP | | | | | | | | | |
| ! H2 的氧化反应,来自文献[9] | | | | | | | | | |
| H2+0.5O2=> | H2O | | | | | 9.870e+08 | 0.0 | 7.404E+03 | |
| FORD / H2 1.0 / | | | | | | | | | |
| FORD / O2 1.0 / | | | | | | | | | |
| ! CO 的氧化反应,来自文献[9] | | | | | | | | | |
| CO+0.5O2=> | CO2 | | | | | 1.259E+13 | 0.0 | 4.060E+04 | |
| FORD / CO 1.0 / | | | | | | | | | |
| FORD / O2 0.25 / | | | | | | | | | |
| END | | | | | | | | | |

2.3 重要物性参数计算

气体组分的比热均给定为温度的分段多项式函数，分段多项式函数分别为高温段与低温段的七系数温度多项式函数。体组分的粘性与导热系数均按分子运动学理论计算，粘性按 Chapman-Enskog 方法计算。热力学参数与动力输运参数以 Chemkin 格式输入。燃烧室中燃气的密度按理想气体定律计算，比热由混合理论计算，热导率与粘性由基于分子运动学理论的理想气体混合律计算，气体混合物的热扩散系数与质量扩散率均由分子运动学理论计算。

液滴的密度、热导率、汽化潜热及二元扩散

率在一定的温度范围内变化不是很大，均给定为对应温度范围内的平均值常数。比热、动力粘度、饱和蒸汽压及表面张力参照火箭煤油的试验参数以拟合的分段温度多项式形式给出。

2.4 边界条件

燃烧室入口处给定质量流量边界条件，为易于计算收敛，先使用总压入口条件计算初场，然后改为质量流量边界条件进行计算。燃烧室出口给定压力出口边界。燃烧室壁面为无滑移、无热流固壁边界。液滴的初始条件为多组滴径分布，初始速度、喷雾角等由喷嘴参数计算得出。液滴与固体外壁面的相互作用使用液膜边界条件处

理,对于蒸发管的内壁面则采用捕获条件,即液滴与壁面碰撞后即刻蒸发。

3 计算结果及分析

3.1 不同阻塞比方案的冷流场研究

为提高燃烧效率和稳定性,火焰稳定装置往往多环布置。这样要兼得高效率与宽的稳定工作范围,就必然导致阻塞比的增大。理论上,大阻塞比的燃烧室流动损失要大。所以将稳定器前后错开布置且带有一定的后掠角度,以减小局部阻塞比,减小流动损失。在相同来流条件的工况下,对应于两种已经设计既定的火焰稳定器结构,研究这两种不同阻塞比($k_1 > k_2$)结构对燃烧室冷流场的影响,以帮助方案初选。

(1) 冷流场速度分布特征

图 1 与图 2 为两阻塞比下相对轴向速度(当地气流轴向速度与入口处轴向速度之比)沿燃烧室轴向的分布规律,其中坐标横轴为燃烧室横坐标除以某特征长度后的无量纲坐标,三个截线分别对应稳定装置后方三个流场特征分析截面。稳定器后的区域为低速区,相对轴向速度均在 0.4 以下,最内环流速较高,最外环则较低。相对速度小于 0 的部分为回流区,大阻塞比结构燃烧室的速度场有不均匀的波动。

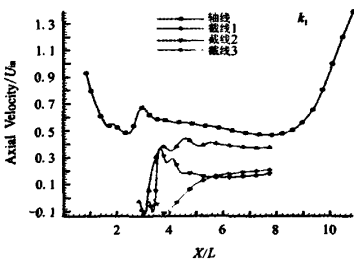


图 1 相对轴向速度沿轴向分布规律
(阻塞比为 k_1)

Fig.1 Distributions of axial velocity normalized by inlet velocity (block-area-ratio is k_1)

(2) 回流区的分布特征

图 3 显示燃烧室中的回流区分布,左右两图分别对应大阻塞比与小阻塞比燃烧室中的回流区

分布。由图知回流区实为一对回转旋涡,受气流粘性作用附着在稳定器主体后方的低速区域。对于两种稳定器构型,对应阻塞比为 k_1 的方案回流区分布极不均匀,特别是外环结构使回流区明显要大。另一种阻塞比为 k_2 的方案回流区分布均匀合理。

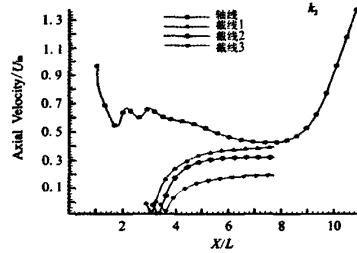


图 2 相对轴向速度沿轴向分布规律 (阻塞比为 k_2)

Fig.2 Distributions of axial velocity normalized by inlet velocity (block-area-ratio is k_2)

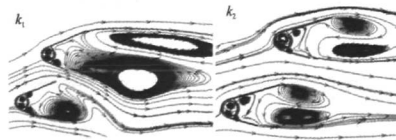


图 3 两方案回流区分布规律

Fig.3 Distributions of recirculation regions

(3) 流动损失比较

分别针对两个阻塞比燃烧室计算无喷油环、有喷油环及将喷油环轴向位置作小幅后移微调三种方案,研究阻塞比及喷油环对阻塞比贡献影响下的流动损失情况。得到各方案的总压恢复系数值见图 4 所示。当阻塞比较小时,总压恢复系数总是相对要大。由喷油环贡献的那部分阻塞比对小阻塞比燃烧室影响要大,但两种方案中小幅地后移喷油环位置未对总压恢复系数造成显著影响。

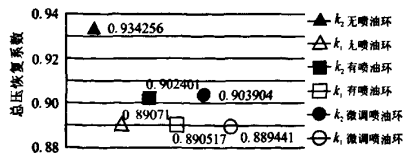


图 4 总压恢复系数比较图

Fig.4 Comparison schematics of total pressure recovery ratio

3.2 稳态燃烧过程研究

(1) 燃油供应方式研究

依冷流场的诸特性,选取冷态流阻特性、回流区特性较好的小阻塞比燃烧室为进一步进行两相反应流场计算的研究对象。燃油在燃烧室中的分布对燃烧过程的影响非常重要,理论上,燃油的分布在各处均匀地接近化学恰当比时会获得较高的燃烧效率。所以如何合理地流向场供应燃油至关重要,由冷流场计算得到的速度场分析,提出两种可行的供油方案:

等面积供油-根据喷油环前方主流的轴向速度分布,除驻点附近区域以外,各环间流道区域的速度几乎相等,均为 200m/s 左右。由此认为各喷油环由等速气流携带的燃油量与气流流通的面积相关,气流流通面积通过稳定器各环间流道的中线将燃烧室分成的三个部分来定义,这样各环的喷油量就按这三个面积来分配供应。

等余气系数供油-考察稳定器附近的气流通量可知,流经各环稳定器的气流量并不均匀。所以将各环的供油量按上述三个气流流通面积对应的流量分配。

按两种方案供油计算得到的温度场见图 5 和图 6。等余气系数供油方案的第一环与第二环稳定器后方燃烧区域要大于等面积供油方案,稳定器后方的总温分布也更加均匀合理。燃烧室中的当量比分布如图 7,两个方案中,化学恰当比曲线(当量比为 1)的形状差别不大。等余气系数供油方案的喷油环与稳定器之间的燃油分布更富集合理,特别是第一环,即燃油在到达稳定器燃烧以前准备得更加充分。温升燃烧效率沿轴向的变化见图 8,其中燃烧效率的定义为 $\eta = \frac{T^* - T_0^*}{T_{th}^* - T_0^*}$,

T^* 为所取截面上质量平均得到的平均总温, T_0^* 为入口来流总温, T_{th}^* 为理论燃烧总温。等余气系数供油方案在每个截面上的燃烧效率均好于等面积供油方案。所以,喷油环按稳定器处的三个气流流通面积对应的空气流量分配供油的假设较为合理。

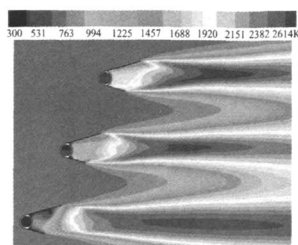


图 5 等余气系数供油方案总温分布

Fig.5 Contours of total temperature in equal-equivalent-ratio fuel feeding case

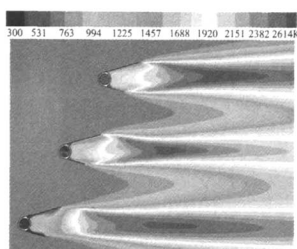
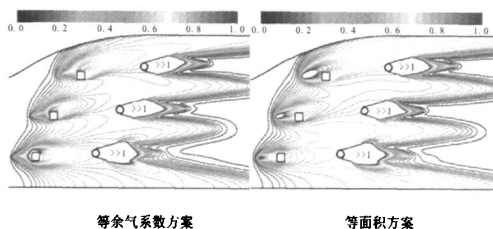


图 6 等面积供油方案总温分布

Fig.6 Contours of total temperature in equal-area fuel feeding case



等余气系数方案

等面积方案

图 7 两方案的当量比分布

Fig.7 Equivalent-ratio distributions of both cases

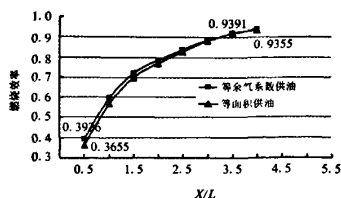


图 8 温升燃烧效率比较图

Fig.8 Combustion efficiency integral curves of both fuel feeding cases

(2) 两相反应流场的一般规律

由以上的总温、当量比分布以及燃烧效率规律图,可以初步得到亚燃冲压发动机燃烧室内两相反应流场的一般规律。尽管来流的总温较高,但由于燃油的蒸发作用,喷油环前方的气流总温要略低一些。燃烧室中温度较高的主火焰区驻定在火焰稳定器的后方,最高温度约为 2600K 左右,主火焰区以外燃烧区域的温度大约在 1800K-2000K 范围之间。喷油环的供油量大时,对应的稳定器后的燃烧情况要相对好些。

受燃油蒸发作用的影响,蒸发管内温度相对要低。最内环稳定器由于经过的气流流速较高,燃油使稳定器主体内流场的温度较低。由于未考虑稳定器主体壁面的传热作用,所以计算得到的稳定器壁面附近的温度比实际值应偏高。燃油在各环稳定器后方的分布规律相似,为先富后贫。随着燃烧的逐渐充分,燃烧效率沿轴向逐渐增大,至喷管出口处达到极大值。

3.3 燃烧室三维流场数值研究

由于二维研究手段的限制,燃烧室结构的简化程度较大,所以有必要在二维计算的基础上开展三维数值研究,以更真实地反应结构对实际工作过程的影响。通过三维流场计算不仅可以对整体流动均匀性、回流区三维分布等做更详细的评价,最重要是对燃油在燃烧室的三维分布规律有更准确的预测,包括燃油在阻塞装置内部及其周围的分布细节,请参见文献[4]。

冷流场计算得到的回流区分布充分体现了径向稳定装置的影响,在远离径向稳定器的轴向截面上基本保持着与二维计算相同的回流区分布。但是在靠近径向稳定器的附近流场,回流区显示出了显著的三维结构特性,在回流区附近采用涡度渲染的流线显示参见图 9。回流区在燃烧室中的分布根本上与气流受阻塞的区域对应,由此影响着整体流动的均匀性。

图 10 给出了两相反应流场二维与三维计算的燃烧效率比较结果。三维计算的喷管入口处的燃烧效率 0.9401 与二维的计算值接近。由于二维计算基于轴对称简化,因此计算的两相反应流场更均匀更理想化,燃烧室径向截面的燃烧效率均

高于三维计算结果。

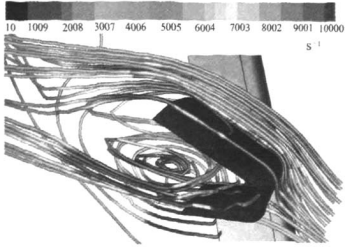


图 9 回流区域流线图 (以涡度渲染)
Fig.9 Pathlines over recirculation region colored by streamwise vorticity

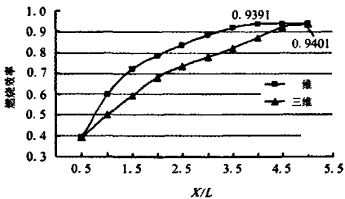


图 10 二维与三维计算燃烧效率比较
Fig.10 Combustion efficiency integral curves of 2D and 3D simulation

3.4 试验结果验证

燃烧室冷流场与两相反应流场的三维计算结果与试验结果的比较见表 2 和表 3。冷流场的计算结果与试验结果吻合得较好,两相反应流场计算的入口马赫数与试验值差别较大。入口马赫数的误差相对较大的一方面原因是试验时,静压孔测量静压时会引入一定的总压成分,实际测量的静压偏高,使得由此计算的马赫数偏低。

表 2 冷流场计算结果与试验结果比较
Tab.2 Comparison of cold-flow simulation results with experiment results

| 比较参数 | 计算值 | 试验值 | 误差/(%) |
|---------------|--------|--------|--------|
| 入口质量流量/(kg/s) | 66.209 | 67.283 | 1.60 |
| 入口马赫数 | 0.973 | 0.915 | 6.34 |
| 燃烧室静压/Pa | 271818 | 274000 | 0.80 |

表 3 燃烧流场计算结果与试验结果比较
Tab.3 Comparison of hot-flow simulation results
with experiment results

| 比较参数 | 计算值 | 试验值 | 误差/(%) |
|--------------|---------|---------|--------|
| 入口总压/MPa | 0.151 | 0.165 | 8.48 |
| 入口马赫数 | 0.420 | 0.362 | 16.00 |
| 稳定器后总压测点/MPa | 0.146 | 0.156 | 6.41 |
| 喷管出口总温/K | 1984.05 | 1899.47 | 4.45 |

4 结论与展望

通过对燃烧室工作过程中冷、热流场的数值计算研究，得到如下结论：

(1) 对于既定设计的两种阻塞比方案，小阻塞比结构的流动损失较小，且有着更好的回流区分布特性。虽然在本文计算中，微调喷油装置与火焰稳定装置相对位置对冷流损失没有显著的影响，但二者的匹配性问题对燃油蒸发、分布及燃烧效率的影响甚大，需进一步开展研究考察详细。

(2) 等余气系数供油方案要优于等面积供油方案，即燃油喷注量按稳定器处对应流通面积的空气流量分配的假设是合理的。所采用的 7 组分 4 步总包反应机理，可以反映亚燃冲压发动机燃烧室的工作过程特点。

(3) 二维计算手段用来比较燃烧室总体性能或验证假设方案时是有效的，三维计算则更能反应燃烧室工作过程的实质。因此，在二维研究的基础上进行三维深入计算是比较合理和实用的方法。

(4) 湍流模型、喷雾的初始条件、蒸发过程假设及燃油与壁面的相互作用等假设对计算结果的影响很大，计算结论还缺乏燃烧室内部直接测量工作参数的验证，下一步应同时开展计算模型与试验相结合的深入研究工作。

参考文献：

[1] 周玉珍, 涡扇发动机总体设计及数值模拟[D]. 北京航空航天大学硕士学位论文, 2001.

[2] 方海生. 两相流动与湍流燃烧的应用[D]. 中国科技大学硕士学位论文, 2005.

[3] 黄日鑫, 谭永华. 亚燃燃烧室两相反应流场的燃烧模型[J]. 火箭推进, 2008, 34(2): 24-30.

[4] 黄日鑫, 谭永华. 亚燃冲压发动机燃烧室燃油浓度分布预测[J]. 火箭推进, 2008, 34(4): 17-21.

[5] Gran I R, Magnussen B F. A Numerical Study of a Bluff-Body Stabilized Diffusion Flame. Part 2. Influence of Combustion Modeling And Finite-Rate Chemistry[J]. Combustion Science and Technology, V119, ppx 191-217, 1996.

[6] Gran I R, Magnussen B F. A Numerical Study of a Bluff-Body Stabilized Diffusion Flame. Part 1. Influence of Turbulence Modeling And Boundary Conditions [J]. Combustion Science and Technology, V119, ppx 171-190, 1996.

[7] Bai X S, Fuchs L, Li Y. Numerical Simulation of Flows Around Flame Holders[R]. AIAA-92-0557, 1992.

[8] Wang T S. Thermo-Kinetics Characterization of Kerosene/RP-1 Combustion[R]. AIAA96-2887, 1996.

[9] Morsi S A, Alexander A J. An Investigation of Particle Trajectories in Two-Phase Flow Systems[J]. J.Fluid Mech. 55(2): 193-208, September 26 1972.

[10] Ranz W E, Marshall Jr W R. Evaporation from Drops, Part I[J]. Chemical Engineering Progress, 48(3): 141-146, March 1952.

[11] Ranz W E, Marshall. Jr W R. Evaporation from Drops, Part II[J]. Chemical Engineering Progress, 48(4): 173-180, April 1952.

[12] Magnussen B F. On the Structure of Turbulence and a Generalized Eddy Dissipation Concept for Chemical Reaction in Turbulent Flow[C]. Nineteenth AIAA Meeting, St.Louis, 1981.

[13] Kundu K P, Penko P F, Yang Songlin. Reduced Reaction Mechanisms for Numerical Calculations in Combustion of Hydrocarbon Fuels[R]. AIAA98-0803, 1998.

[14] Kenneth K Kuo. Principles of Combustion [M]. Second Edition, John Wiley & Sons, New York, 2005.

(编辑：王建喜)