

过氧化氢 / 煤油发动机推力室 气液燃烧数值模拟

李 强, 聂 嵩, 刘业奎, 潘 亮, 马梦颖
(北京航天动力研究所, 北京 100076)

摘 要: 采用离散相模拟颗粒随机轨道方法处理两相流动, 采用 SST $k-\omega$ 湍流模型, 利用燃料的单步总反应模型模拟煤油蒸汽燃烧, 针对过氧化氢/煤油发动机推力室, 进行三维两相燃烧数值模拟。对推力室的总体流场特征及性能进行了初步研究, 为开展进一步的数值研究奠定基础。

关键词: 过氧化氢发动机; 推力室; 燃烧; 数值模拟

中图分类号: V434-34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374 (2011) 04-0035-05

Numerical simulation of combustion characteristics for thrust chamber in hydrogen peroxide/kerosene engine

LI Qiang, NIE Song, LIU Ye-kui, PAN Liang, MA Meng-ying
(Beijing Aerospace Propulsion Institute, Beijing 100076, China)

Abstract: The gas-liquid combustion and flow field in HTP/kerosene engine thrust chamber were numerically simulated in the paper. Discrete phase modeling (DPM) and SST $k-\omega$ turbulence model were used to simulate the kerosene gas-liquid flow and turbulence respectively. A one-step general reaction model of fuel was employed to simulate the kerosene vapour combustion. The combustion flow field and performance parameters of the combustion chamber were numerically investigated. A foundation for the further numerical research was established in this paper.

Keywords: hydrogen peroxide engine; thrust chamber; combustion; numerical simulation

0 引言

随着航天技术的不断发展以及环保要求的日益提高, 绿色推进剂已成为未来航天推进的发展趋势。高浓度过氧化氢是一种无毒、无污染、高

密度、易贮存的绿色推进剂。过氧化氢/碳氢燃料发动机^[1-3]具有低成本、高密度比冲、可贮存、无毒无污染等优点。

作为过氧化氢/碳氢燃料发动机的一个关键部件, 推力室的研制水平在很大程度上决定了整个发动机的研制水平和工作特性。推力室的工作特

收稿日期: 2010-11-24; 修回日期: 2011-04-20

基金项目: 中国航天科技集团公司支撑项目

作者简介: 李强 (1981—), 男, 工程师, 博士, 研究领域为液体火箭发动机

性包括性能（燃烧效率、喷管效率等）、燃烧稳定性和相容性（传热安全），这都与推力室的燃烧过程有着直接的关系。在进行推力室燃烧过程的设计和改进行时，数值模拟是除了理论分析和试验研究外的第三种研究手段。

20 世纪 80 年代，燃烧模拟已经成为导致燃烧科学取得重大进展的一个重要研究方法，现已应用于各种燃烧领域^[4]。燃烧模拟的主要作用包括^[5]：

- 1) 模拟燃烧过程和预估不同条件下的燃烧性能；
- 2) 最大限度地减少复杂和昂贵的燃烧试验；
- 3) 用于各种燃烧故障的分析；
- 4) 指导燃烧试验设计；
- 5) 发现新的和了解观察到的燃烧现象。

燃烧室内温度分布能够揭示燃烧室内发生化学反应的主要分布区域，可以判断火焰的形状及燃烧面与喷注器面板的距离；燃烧室出口氧化剂和燃料的质量浓度的高低可以揭示燃烧室的燃烧效率；绝热壁面壁温的高低能够反映燃烧室内推进剂化学能的释放情况，可以评估燃烧室热载荷的大小及其分布情况。

气液两相燃烧数值模拟考虑解决以下关键问题：

- 1) 煤油喷注为液态，必须考虑两相流动；
- 2) 煤油的成分较为复杂，其反应机理涉及近千个基元化学反应，采用简化的反应机理是进行煤油化学反应流场模拟的关键；
- 3) 燃烧室气喷嘴等结构导致的高速剪切边界层和局部回流区中存在较强的湍流，必需考虑湍流效应。

1 推力室模型

过氧化氢/煤油发动机推力室模型如图 1 所示，喷注器面板上包含有气喷嘴和煤油喷嘴。推力室计算网格包含了从过氧化氢催化分解气（富氧过热蒸汽）进入气喷嘴到燃烧产物排出短喷管的整个计算域。为了提高模拟湍流流动的精度，固体壁面附近区域的网格进行了局部网格加密处

理，推力室模型网格总数 882361。

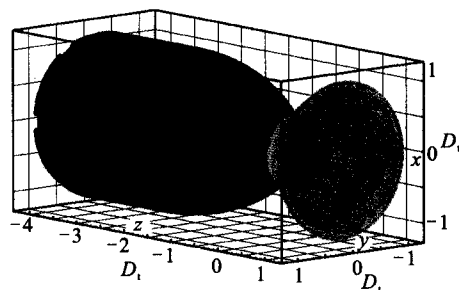


图 1 推力室模型

Fig. 1 Thrust chamber model

2 数学模型

2.1 控制方程

推力室的气体湍流流动和气相燃烧过程的控制方程采用包含多组分带化学反应的雷诺平均 N-S 方程来描述

$$\frac{\partial \vec{Q}}{\partial t} + \frac{\partial (\vec{E} - \vec{E}_v)}{\partial x} + \frac{\partial (\vec{F} - \vec{F}_v)}{\partial y} + \frac{\partial (\vec{G} - \vec{G}_v)}{\partial z} = \vec{S} \quad (1)$$

2.2 湍流模型

燃烧流场的数值模拟必须考虑湍流的影响。湍流计算精度取决于选取的湍流模型。常用的湍流模型 $k-\varepsilon$ 模型和 $k-\omega$ 模型，大量应用于各种流动的湍流模拟，但是在近壁面区域会导致刚性问题和不够精确。Menter 发展的 SST $k-\omega$ 模型^[6,7]，在广泛的领域中可以独立于 $k-\varepsilon$ 模型，使得在近壁自由流中 $k-\omega$ 模型有广泛的应用范围和精度，SST $k-\omega$ 模型吸收了 $k-\varepsilon$ 模型和 $k-\omega$ 模型的优点，其特点是：（1）加权模型系数；（2）限制快速应变流中的湍流黏性系数增长；（3）该模型对湍流黏性函数进行了修改，以加强对分离流动的预测。因此，本文选择 SST $k-\omega$ 模型。

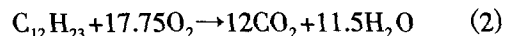
2.3 离散相模型

气液两相数值模拟可分为欧拉-拉格朗日方法（颗粒轨道法）和欧拉-欧拉方法（双流体方法）两类。欧拉-欧拉方法适用于稠密两相流，但是不易处理相间存在复杂相互作用的问题。欧拉-拉格朗日方法适用于稀疏两相流（一般要求

液相体积分数不大于 15%)。本文数值模拟中, (1) 液态煤油采用喷嘴喷注, 并且煤油密度相对较大, 所占体积分数很小, 符合欧拉-拉格朗日方法的适用范围; (2) 燃烧室流场中, 煤油液滴和气相存在相间滑移, 并且具有经历较为复杂的过程, 如蒸发、混合、燃烧等。采用欧拉-拉格朗日方法易于处理。

2.4 化学动力学模型

模拟化学反应的化学动力学模型一般可以分成四类: 详细反应机理、基元反应机理、简化反应机理和总反应机理。煤油是一种成分复杂的高分子碳氢混合物, 与氧气的燃烧化学反应过程中包含有煤油中各种高碳分子的热裂解及其裂解产物与氧气产生的链反应, 整个反应过程并未研究清楚, 目前还不能完全模拟实际物理和化学过程^[8]。本文将煤油简化为 $C_{12}H_{23}$, 采用单步总反应模型



各个组分的化学反应速率用有限反应速率模型来描述, 忽略湍流对化学反应速率的影响, 化学反应速率由 Arrhenius 形式表示。

2.5 物性参数

数值模拟中涉及到的物质有煤油蒸气、氧气、二氧化碳和水蒸气四种气体以及液态煤油。比热容由分段多项式拟合公式 (式 3) 表示, 拟合公式系数见表 1。

$$c_p(T) = a_1 + a_2 T + a_3 T^2 + a_4 T^3 + a_5 T^4 \quad (3)$$

混合气体的导热系数和动力黏度按理想气体混合定律计算。各气体物质的导热系数按分子动力学理论^[10]计算, 动力黏度由三系数指数定律 (式 4) 计算, 系数见表 2。

$$\mu = \mu_0 \left(\frac{T}{T_0} \right)^n \quad (4)$$

表 1 比热容多项式拟合公式系数

Tab. 1 Coefficients of specific thermal capacity polynomial

	$C_{12}H_{23}(g)$	O_2	CO_2	H_2O	$C_{12}H_{23}(L)$
温度范围/K	220~550	300~1000	300~1000	300~1000	300~1000
a_1	9.466489×10^2	8.348265×10^2	8.413765×10^2	1.233234×10^3	1.0371×10^2
a_2	-8.407472×10^{-1}	2.929580×10^{-1}	5.932393×10^{-1}	1.410523×10^0	6.6168×10^0
a_3	3.131808×10^{-2}	-1.495637×10^{-4}	-2.415168×10^{-4}	-4.029141×10^{-4}	-4.0331×10^{-3}
a_4	-6.627460×10^{-5}	3.413885×10^{-7}	4.522728×10^{-8}	5.542772×10^{-8}	1.4615×10^{-6}
a_5	4.687902×10^{-8}	$-2.278358 \times 10^{-10}$	$-3.153130 \times 10^{-12}$	$-2.949824 \times 10^{-12}$	
温度范围/K		1000~5000	1000~5000	1000~5000	1000~4000
a_1		9.607523×10^2	4.299289×10^2	1.563077×10^3	1.2364×10^3
a_2		1.594126×10^{-1}	1.874473×10^0	1.603755×10^0	3.8886×10^0
a_3		-3.270885×10^{-5}	-1.966485×10^{-3}	-2.932784×10^{-3}	-1.5679×10^{-3}
a_4		4.612765×10^{-9}	1.297251×10^{-6}	3.216101×10^{-6}	2.8763×10^{-7}
a_5		$-2.952832 \times 10^{-13}$	$-3.999956 \times 10^{-10}$	-1.156827×10^{-9}	

表 2 动力黏度三系数指数定律系数

Tab. 2 Coefficients of formula (4)

系数	O ₂	CO ₂	H ₂ O	C ₁₂ H ₂₃ (g)
μ_0	1.919×10^{-5}	1.370×10^{-5}	1.703×10^{-5}	4.435×10^{-5}
T_0	273.11	273.11	416.67	273.11
n	0.69	0.79	1.04	0.6

2.6 边界条件

气喷嘴入口为质量入口边界, 给定气喷嘴入口的质量流量、总温、各气体组分浓度、水力直径以及湍流强度等参数。燃烧室出口为压力出口边界, 给定出口的压力、水力直径以及反流湍流强度等参数。燃烧室壁面采用绝热、无滑移固体壁面边界条件。

3 数值模拟流场与分析

从煤油喷嘴喷射的煤油液滴颗粒轨迹如图 2 所示。图中不同的灰度表示不同的液滴颗粒直径。由于从周围燃气吸热导致液滴蒸发, 从煤油喷嘴喷射后, 煤油液滴直径逐渐减小。在到达收敛段前, 煤油液滴在燃烧室圆柱段内完全蒸发。

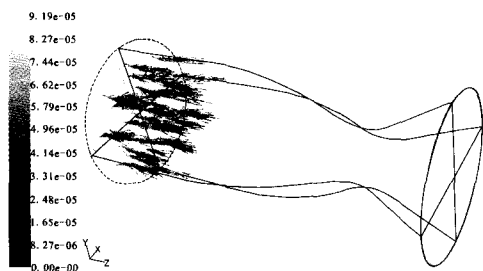


图 2 煤油液滴颗粒轨迹 (直径单位: m)

Fig. 2 Particle tracks of kerosene droplets (Unit: m)

推力室内温度分布如图 3 所示。喷注器的结构形式引起燃烧室圆柱段区域温度分布显著分层, 最大火焰温度约为 3200 K。在收敛段和扩散段两部分区域也观察到了这样的温度分层现象。在推力室圆柱段中火焰高温区靠近煤油液柱, 并朝向收敛段入口截面方向发展。从收敛段入口截

面到喉部之间的区域, 火焰相互影响, 除中心区小部分区域外, 整个横截面产生高温燃气。在喉部下游, 燃气膨胀, 转换为超声速流动, 燃气温度逐渐降低。另外, 受边区气膜冷却的影响, 靠近燃烧室固体壁面的附近区域温度较低。

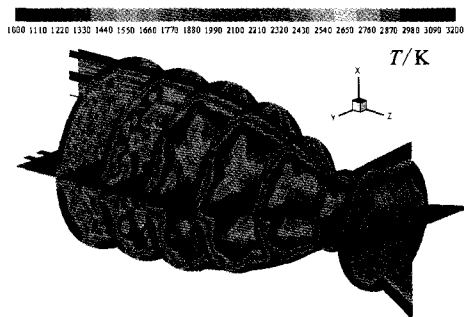
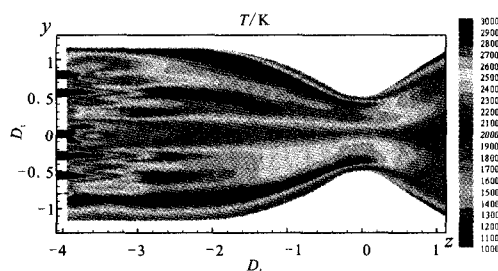
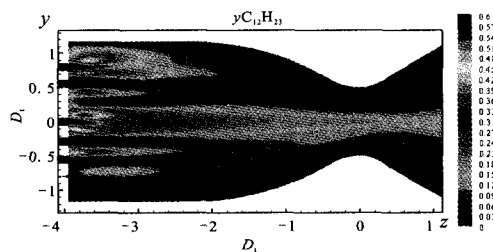


图 3 推力室内温度分布图

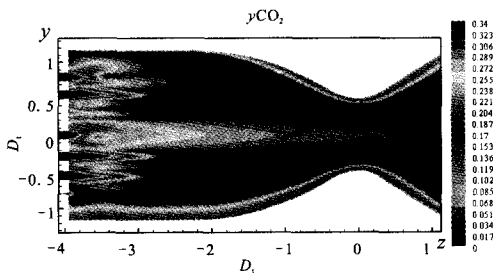
Fig. 3 Temperature distribution in thrust chamber



a) 温度分布云图



b) 煤油蒸气质量分数分布云图



c) 二氧化碳质量分数分布云图

图 4 温度和气体质量分数云图 ($x=0$ 截面)

Fig. 4 Contour plots of static temperature and gas mass fraction

推力室内的温度以及 $C_{12}H_{23}$ 和 CO_2 气体组分质量分数分布云图如图 4 所示。煤油液滴颗粒喷注液柱附近区域的温度较高, CO_2 浓度相应地也更高, 特征速度效率约为 95.4%。由于喷注器中心的喷注单元的混合比很低 (约为 1), 为高富燃状态, 在模拟结果中表现为: 在推力室轴线附近的中心区域, 燃烧温度较低 (略低于 2000 K), $C_{12}H_{23}$ 气体质量分数也较高; 在喉部横截面中心区 $C_{12}H_{23}$ 气体质量分数超过 0.174, 仍然为富燃状态; 随着与喷注器面板距离的增加, 轴线附近中心区的温度逐渐增加, $C_{12}H_{23}$ 气体质量分数也逐渐降低。由此看出, 为提高燃烧效率, 喷注器的混合比布置仍有设计改进的余地。

推力室固体壁面绝热温度分布云图如图 5 所示。从图中可以看出, 除了由于气膜冷却周向布置不均匀而引起的六条热斑外, 其余固体壁面区域的温度均不高。绝热壁面壁温分布反映了推力室内靠近固体壁面区域推进剂化学能的释放情况, 并且能够指导推力室再生冷却设计。

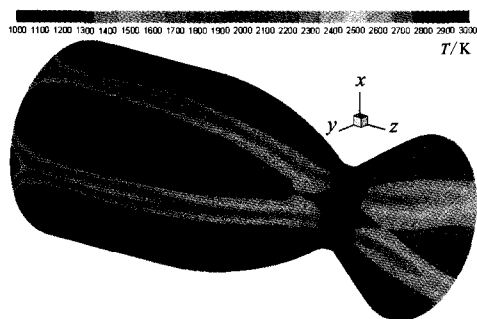


图 5 推力室身部壁面温度分布云图

Fig. 5 Temperature contour on wall of thrust chamber

4 结束语

通过对推力室内氧化氢/碳氢燃料三维两相燃

烧数值模拟, 对推力室的总体流场特征及性能进行了初步研究和分析, 数值模拟工作的成果为燃烧效率的提高和冷却的设计提供了有益的参考和补充, 并且为后继开展进一步的数值研究奠定基础。

参考文献:

- [1] VENTURA M, GARBODEN G. A Brief history of concentrated hydrogen peroxide uses, AIAA 99-2739 [R]. Los Angeles, California: General kinetics, LLC, 1999.
- [2] VENTURA M AND MULLENS P. The use of hydrogen peroxide for propulsion and power, AIAA 99-2880 [R]. Los Angeles, California: General kinetics, LLC, 1999.
- [3] 林革, 凌前程, 李福云. 过氧化氢推力室技术研究[J]. 火箭推进, 2005, 31(3): 1-4.
- [4] 庄逢辰. 液体火箭发动机喷雾燃烧的理论、模型及应用 [M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 1995, 7.
- [5] KUO K K. Principles of combustion [M]. New York: John Wiley & Sons, 1986.
- [6] MENTER F R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications [J]. AIAA Journal, 1994, 32(8): 1598-1605.
- [7] MENTER F R, KUNTZ M, LANGTRY R. Ten years of experience with the SST turbulence model [C]// Turbulence, Heat and Mass Transfer. [S. l.]: Begell House Inc., 2003: 625-632.
- [8] WANG T S. Thermophysics characterization of kerosene combustion, AIAA 2000-2511 [R]. USA: AIAA, 2000.
- [9] MOLNAR M, MAREK C J. Reduced equations for calculating the combustion rates of Jet-A and methane fuel, NASA TM-2003-212702 [R]. USA: NASA, 2003.
- [10] HIRSCHFELDER J O, CURTISS C F, BIRD R B. Molecular theory of gases and liquids [M]. New York: John Wiley & Sons, 1954.

(编辑: 陈红霞)