

时空守恒 CE/SE 数值方法 在凹槽燃烧流动中的应用研究*

凌文辉^{1,2}, 赵书苗², 刘建文², 刘凤君²

(1. 南京航空航天大学 能源与动力学院, 江苏 南京 210016

2. 北京动力机械研究所, 北京 100074)

摘 要: 应用时空守恒元和解元 CE/SE 方法, 发展了求解化学反应流场的三维并行计算程序。为验证程序, 对超声速冲压喷射燃烧室模型进行了计算, 计算结果与实测数据以及相关文献的计算结果吻合较好, 验证了本文的处理方法和程序的正确性。采用 H_2 和 O_2 的 8 组分 34 基元化学反应模型, 对不同长深比的凹槽燃烧流动进行了数值模拟, 分析了凹槽增强混合对稳定火焰的作用。计算结果表明, CE/SE 方法具有模拟凹槽超声速燃烧流动的能力, 数值模拟的结果有助于认识凹槽的火焰稳定机理。

关键词: 时空守恒元和解元方法; 基元化学反应; 并行计算; 凹槽; 数值仿真

中图分类号: V235.21 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4055 (2010) 01-0034-08

Numerical investigations of the cavity combustion flow using the CE/SE method

LING Wen-hui^{1,2}, ZHAO Shu-miao², LIU Jian-wen², LIU Feng-jun²

(1. Coll. of Energy and Power, Nanjing Univ. of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China

2. Beijing Power Machinery Research Inst., Beijing 100074, China)

Abstract A three-dimensional parallel program based on unstructured grid for reacting flows was developed using the CE/SE method. Firstly, a scram jet combustor model was chosen to validate the present program. The computed results agree well with the experimental data. And then, the cavity combustion flows with three length-to-depth ratios were simulated under stoichiometric conditions by using 8-species, 34-elementary reaction model. The flame-holding and mixing enhancement characteristics of the cavities were evaluated. It demonstrates that CE/SE method is able to simulate the supersonic combustion of cavities, and the numerical studies can help understand the flame holding mechanism of the cavity.

Key words CE/SE; Elementary reaction; Parallel computation; Numerical simulation; Cavity

1 引 言

时空守恒元和解元方法 (CE/SE) 是由 NASA Lewis 研究中心的 Chang S C 博士^[1]于 1991 年提出来的。CE/SE 方法在格式构造的概念和原理上显著区别于传统的中心和迎风类型的差分格式, 数学原理简单, 物理概念清晰, 其独特的性质包括: (1) 统一处理由时间和空间构成的通量平衡, 独立变量的空间导数不是通过插值得到, 而是和独立变量一样成为求解变量, 减小数值误差; (2) 不使用 Riemann 变量, 直截

了当地推广至非常复杂的物理流动, 如, 气蚀 (Cavitation), 磁流体动力学 (MHD), 反应流动和声学问题等; (3) 全新的激波捕捉方法 (不使用 Riemann 求解器), 激波间断的数值分辨率高; (4) 基于当地时空通量守恒建立的反射边界条件, 无反射边界条件和无滑移固壁边界条件简单易行、有效; (5) 不使用时间项预处理 (Preconditioning) 技术可以计算含有高速及局部低速的流动, 是一个全速度 (All speed) 计算方法; (6) 数值耗散小, 刻画流动信息的能力强, 可以在一个计算区域内同时捕捉激波和声波, 尽管跨越激波

* 收稿日期: 2008-10-25 修订日期: 2009-09-12

作者简介: 凌文辉 (1968—), 男, 博士生, 研究员, 研究领域为冲压发动机。E-mail: linwenhui2008@sina.com

的压力振幅可以是声波的若干个数级; (7) 使用结构网格和非结构网格, 适用于复杂几何结构的计算。到目前为止, CE/SE 方法已被成功地用于一般流体动力学, 化学反应流动, 声学, 噪音, 气蚀和磁流体动力学等领域的数值模拟^[2-6]。

超燃冲压发动机的燃料在燃烧室内停留时间非常短暂, 时间量级是在毫秒的范围内, 要在这么短的时间完成燃料的喷射、燃料与气流的掺混、点火和燃烧, 这就增加了火焰稳定的困难。为了增强燃料掺混和稳定燃烧, 凹槽是超声速燃烧室中广为采用的一种装置, 它能够诱发旋涡结构而增强燃料与空气的掺混, 并可通过凹槽内的回流区所提供的引导火焰来促进着火和火焰稳定。

国外对 CE/SE 方法在化学反应流动方面开展了很多研究, 文献[7, 8]应用 CE/SE 方法对一维、二维、三维爆轰反应流动进行了计算和研究。国内相对起步较晚, 在 CE/SE 的应用上开展的工作较少, 主要集中在激波捕捉和爆轰计算, 文献[9]采用 H_2/O_2 的 8 组分 24 基元反应对一维氢氧爆轰波传播过程进行了数值计算。目前国内的 CE/SE 应用研究, 还局限于二维流动, 尚没有 CE/SE 方法在三维计算方面的应用研究。

本文采用基元反应机理对化学反应过程进行数值模拟, 求解的方程数目大大增加, 带来的计算量也相应的增加, 此外, 与传统的差分格式相比, CE/SE 方法需更多的计算资源。对此问题的理想解决方案是应用并行计算技术, 将计算域划分为多个子计算域, 在高性能并行计算服务系统上完成计算。为了解决化学反应带来的方程刚性问题, 本文采用分裂的方法, 将求解过程分成两步, 第一步不考虑化学反应源项, 计算流场值, 第二步将第一步的结果作为初始值, 计算由于化学反应的作用, 得到流场的解。本文首先对超声速冲压喷射燃烧室模型进行了计算, 计算结果与实测数据以及相关文献的计算结果吻合较好, 验证了三维 CE/SE 化学反应流动计算程序的正确性; 然后, 本文基于非结构四面体网格, 采用三维 CE/SE 方法、并行分区技术和 H_2/O_2 的 8 组分 34 基元化学反应模型, 对 $LD = 3$ $LD = 7.76$, $LD = 15$ 三种长深比凹槽燃烧流动过程进行了数值模拟。

2 控制方程

三维非定常、多组分掺混流动的控制方程组可以用向量的形式表示为

$$\frac{\partial u_m}{\partial t} + \frac{\partial (f_m^x - f_{mv}^x)}{\partial x} + \frac{\partial (f_m^y - f_{mv}^y)}{\partial y} + \frac{\partial (f_m^z - f_{mv}^z)}{\partial z} = S \quad (1)$$

式中 u_m 是守恒变量, f_m^x, f_m^y 和 f_m^z 是无粘通量, f_{mv}^x, f_{mv}^y 和 f_{mv}^z 是粘性通量, S 是化学反应源项, 分别定义为

$$u_m = \begin{bmatrix} \rho_1 \\ \rho_2 \\ \vdots \\ \rho_s \\ \rho u \\ \rho v \\ \rho w \\ \rho E \end{bmatrix}, f_m^x = \begin{bmatrix} \rho_1 u \\ \rho_2 u \\ \vdots \\ \rho_s u \\ \rho u^2 + p \\ \rho uv \\ \rho aw \\ (\rho E + p)u \end{bmatrix}, f_m^y = \begin{bmatrix} \rho_1 v \\ \rho_2 v \\ \vdots \\ \rho_s v \\ \rho uv \\ \rho v^2 + p \\ \rho vw \\ (\rho E + p)v \end{bmatrix}, f_m^z = \begin{bmatrix} \rho_1 w \\ \rho_2 w \\ \vdots \\ \rho_s w \\ \rho aw \\ \rho w^2 + p \\ (\rho E + p)w \end{bmatrix}, S = \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \vdots \\ \omega_s \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

式中 ω_i 是第 i 种组分的化学反应生成速率; $f_{mv}^x, f_{mv}^y, f_{mv}^z$ 是粘性通量, 表示为

$$f_{mv}^x = \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ \tau_{xx} \\ \tau_{xy} \\ \tau_{xz} \\ u\tau_{xx} + v\tau_{xy} + w\tau_{xz} - q_x \end{bmatrix}, f_{mv}^y = \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ \tau_{yx} \\ \tau_{yy} \\ \tau_{yz} \\ u\tau_{yx} + v\tau_{yy} + w\tau_{yz} - q_y \end{bmatrix},$$

$$f_{mv}^z = \begin{pmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ \tau_{zx} \\ \tau_{zy} \\ \tau_{zz} \\ u\tau_{zx} + v\tau_{zy} + w\tau_{zz} - q_z \end{pmatrix}$$

式中 ρ_k 是第 k 种组分的密度, 混合物的总密度可以表示为

$$\rho = \sum_{k=1}^{N_s} \rho_k \quad (2)$$

u , v 和 w 分别是直角坐标系下三个方向的速度分量。包含多组分的控制方程在形式上和求解方法上都与基本流动控制方程差别不大, 但是方程中有些变量的求解却有很大的不同。这里主要介绍一下能量的表达式 ρE , 假设每种组分的质量分数用 Y_k 表示, 共有 N_s 种组分, 焓用 h_k 表示, 单位体积内的总能量为

$$\rho E = \rho h - p + \frac{1}{2} \rho (u^2 + v^2 + w^2) = \rho \sum_{k=1}^{N_s} Y_k h_k - p + \frac{1}{2} \rho (u^2 + v^2 + w^2) \quad (3)$$

某一组分在温度 T 时的焓 (h_k^T) 又可以表示为

$$h_k^T = h_k^{T_0} + \int_{T_0}^T c_p(t) dt \quad (4)$$

式中 T_0 为参考温度, 等压比热 c_p 不能再看作定值, 一般可以写成温度的四次多项式形式。压强可以由理想气体状态方程给出

$$p = \rho R T = \rho R_u \left| \sum_{k=1}^{N_s} \frac{Y_k}{w_k} \right| T \quad (5)$$

式中 w_k 是各组分的摩尔质量, R_u 是通用气体常数, 一般取 $R_u = 8314.41 \text{ J/(kmol} \cdot \text{K)}$ 。

3 数值方法

CE/SE 方法的基本原理和方法在文献 [1~3, 7] 中已做了详细阐述, 以下对刚性化学反应源项的求解、并行分区和并行边界的处理等方面作具体说明。

3.1 化学反应模型和源项的处理

有限速率化学反应模型的一般形式可写为

$$\sum_{i=1}^{N_s} v_{ij}' M_i = \frac{k_{fj}}{k_{bj}} \prod_{i=1}^{N_s} v_{ij}'' M_i \quad (6)$$

由质量作用定律可得, 第 i 种组分的反应生成速率为

$$\omega_i = W_i \sum_{j=1}^{N_R} (v_{ij}'' - v_{ij}') (k_{fj} \prod_{l=1}^{N_s} n_l^{v_{lj}''} - k_{bj} \prod_{l=1}^{N_s} n_l^{v_{lj}'}) \quad (7)$$

N_R 是基元反应的总数目, N_s 是反应物的总数目, W_i 是第 i 种组分的摩尔质量, k_{fj} 和 k_{bj} 是第 j 个基元反应的正、逆反应速率常数, k_{fj} 可以由 Arrhenius 定律得到

$$k_{fj} = A_j T^n \exp(-E_a / R_u T) \quad (8)$$

式中 A_j 为指前因子, n 为温度指数, E_a 为活化能, T 为温度。 k_{bj} 可以由化学反应平衡常数 k_{eq} 求出

$$k_{bj} = \frac{k_{fj}}{k_{eq}} \quad (9)$$

由于化学反应的特征时间远小于流场的特征时间, 为了解决化学反应所造成的方程的刚性问题, 本文利用分裂的方法, 把求解过程分成两步:

(iv) 不考虑化学反应源项, 求出流场在某一时刻的解, 得到各组分的质量分数。方程 (3) 含有组分焓项, 它是关于温度的非线性方程, 可以通过牛顿迭代法求解, 再由气体状态方程 (5) 计算出压强;

(⑤) 把 (iv) 的结果作为初始值, 计算由于化学反应作用, 流场在一个时间步长后的解。

对于 (iv) 采用 CE/SE 方法直接求解, 对于 (⑤) 中源项计算采用变系数常微分方程求解器 DVODE^[10], 调用 CHEMKIN^① 计算各组分的热力学特性和反应物生成率, 最终得到各组分的质量分数、温度和压强。

3.2 并行分区和并行边界的处理

CE/SE 方法使用非结构网格, 类型既可以是四面体也可以是六面体, 本文使用的网格单元类型是四面体。CE/SE 并行计算程序需要执行四个步骤: (1) 对整个计算域生成非结构网格; (2) 使用 METIS 对计算域进行子计算域的划分, 子计算域的数目与并行的 CPU 数目相同, METIS 是一个网格分解的程序, 由 University of Minnesota 发展, 可以在公共网上下载; (3) CE/SE 求解器计算子计算域上的流动, 负责一个子计算域的 CPU 将与其相邻子域的 CPU 进行通讯, 在子域之间的交互面上共享数据, 这个过程需借助 CPU 之间的通讯协议标准 MPI 来实现; (4) 计算结束之后, 将子域上的数据合成为整个计算域上的数据。图 1 为上述四个步骤的说明, 该图显示使用四个 CPU 的并行计算, 但不局限于此, 可以根据计算需要使用任意 CPU 数目。

物理边界的处理方法和通常方法^[12]相同, 对于 METIS 网格划分所产生的内边界, 即并行边界, 可以通过引入虚拟网格的方法来解决。假设 domain 1 和 domain 2 是两个相邻的网格块, 对于 domain 1 的虚拟网格, 它与 domain 2 的内网格相重叠; 对于 domain 2

的虚拟网格,它与 domain 1 的内网格相重叠。因此,虚拟网格的值由其所对应的内网格单元得到,此过程不需要任何的插值或近似,只需要相邻处理器之间的数据传递。处理器之间的通信采用 MPI 使用 MPI_SEND 和 MPI_RECV 函数实现数据的传递和接收。

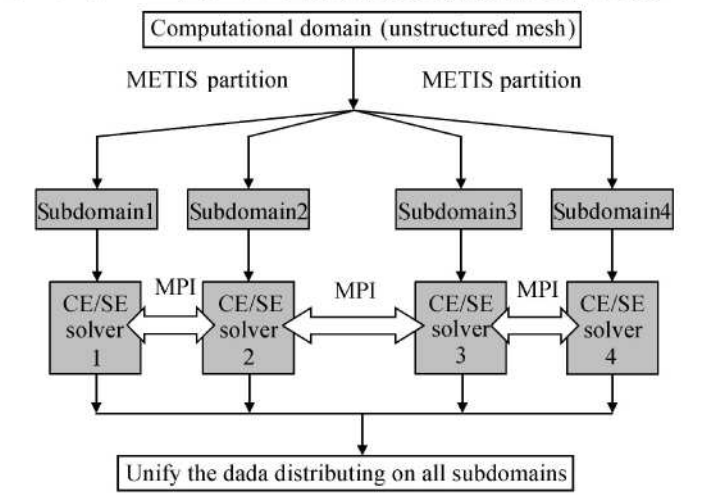


Fig 1 CE/SE parallel computation

4 计算结果与讨论

4.1 算例验证

为了验证本文发展的 CE/SE 并行计算程序,对超声速冲压燃烧室(如图 2(a))进行计算,采用的三维计算模型与文献[13]相同。空气入口高为 50 mm,在半楔角为 6°的板后面是宽为 1 mm 的 H₂ 入口, H₂ 以声速流动,具体的楔形板的位置如图 2(b)所示。后面的燃烧室上壁面与水平方向有 3°的夹角。燃烧室宽度 z 方向取 5 mm。计算的四面体网格单元数目是 410 220。入口的参数在表 1 中给出。

Table 1 Inlet boundary conditions

Parameter	Boundary type	
	H ₂	Air
p_0/MPa	23	75.1
T_0/K	480	600
Ma	1.0	2.0
$U/(\text{m/s})$	1519.5	746.12
H ₂	1.0	0.0
H ₂ O	0.0	0.0491
N ₂	0.0	0.7446
O ₂	0.0	0.2063

图 3 和图 4 分别给出了对称面上 x 方向不同位

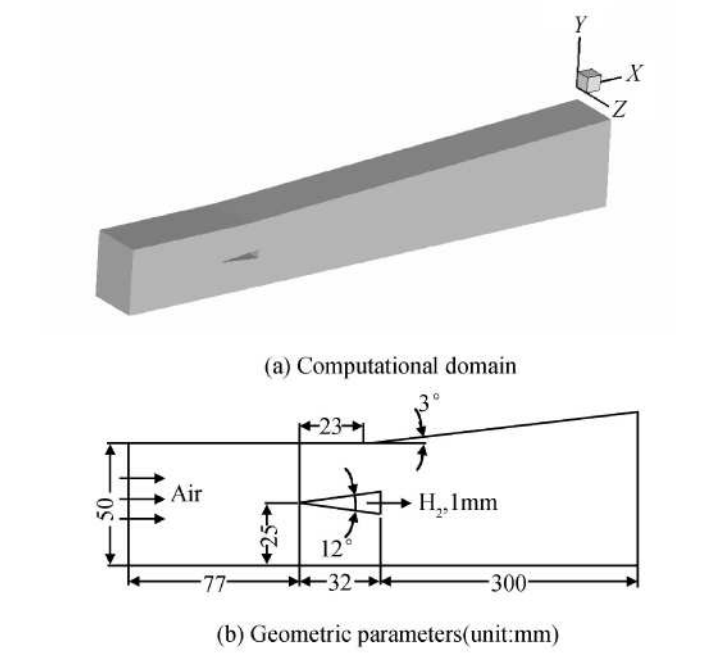


Fig 2 Flow model

置上(计算域的最左侧设为 $x=0$)的速度和总压的比较,可以看出本文的计算结果和实验数据^[13]吻合较好,只是在 H₂ 喷射的水平轴线附近区别较大。这就验证了本文 CE/SE 方法和并行程序的正确性。

图 5(a-h-c)给出了冷态计算流场的马赫数、密度和温度的分布云图,可以看出由于燃烧室壁面的限制,激波在燃烧室内反射和相互作用,形成十分复杂的波系。图 5(d)给出了对称面上 H₂ 质量分数的分布,喷口附近 H₂ 质量分数比较大,在燃烧室中, H₂ 逐渐与来流气体掺混, H₂ 的质量分数逐渐变小。

4.2 凹槽燃烧计算的结果与分析

三维凹槽计算模型如图 6 所示。超声速来流马赫数为 $Ma=2.0$ 雷诺数为 $Re=4.5\times10^7$, 凹槽的深度 $D=6.35\text{ mm}$, 长深比为 $\frac{L}{D}=7.76$ 。计算域在宽度方向(z 方向)取 2.5 mm。在凹槽上游,距离凹槽前面拐角 100 处,开了一个宽为 0.2D 的喷口,图 6(b)给出了喷射 H₂ 的示意图。计算中壁面采用绝热壁面边界条件,上边界是远场出口边界,右边是超声速出口边界,应用无反射边界条件。空气和氢气入口的参数在表 2 中给出。计算域四面体网格单元数目是 216 672。在初始条件中,凹槽中的速度设为 Q 整个流场的密度和压力都设为自由来流的值。

从图 7 的凹槽中的流线上可以看出,在凹槽中存在明显的回流区,使得 H₂ 和 O₂ 有足够的时间充分混合,预混气在凹槽的驻留时间延长,有利于实现充分燃烧,这就起到延长 H₂ 驻留时间和稳定火焰的

作用。与壁面无凹槽的结构相比,进入凹槽的氢气增多且在凹槽内部的驻留时间加长,故在凹槽内部实现了自燃点火。从图 8(a) H_2 分布云图上可以看出, H_2 充满了整个凹槽,在剪切层中,空气和 H_2 充分混合,很容易就发生了燃烧,而且在剪切层中产生的是一个超声速燃烧的过程。从燃烧的产物 H_2O 的分布云图(图 8(b))也可以看出在凹槽中发生了燃烧。凹槽

内部发生燃烧可为凹槽上方或凹槽下游的可燃混气提供热量和活性自由基 OH (图 8(c)),从而可促进凹槽外部的氢气着火;流经凹槽的氢气不断地进入凹槽并发生燃烧,可持续向凹槽外部传热传质,从而实现了火焰稳定。从图 8(d) 马赫数分布图上可以看出,凹槽内部流速较慢,回流作用显著,氢气浓度相对较高,故易于着火且火焰也比较稳定。

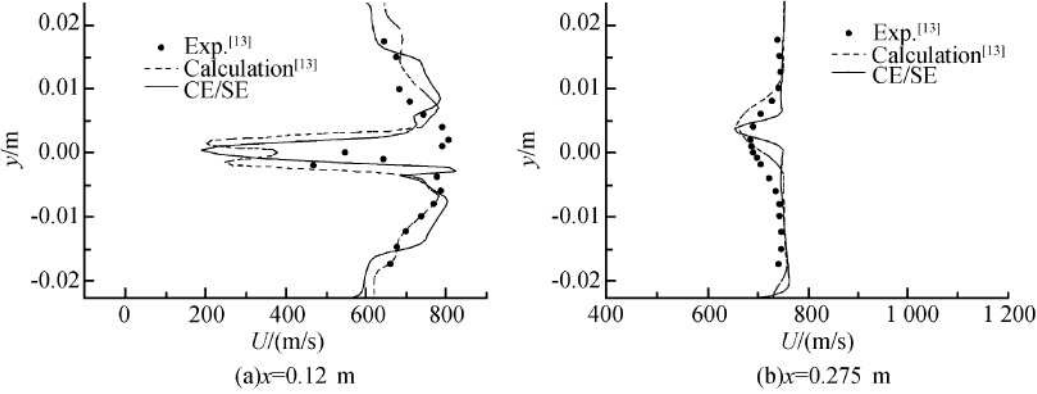


Fig 3 Velocity profiles on the symmetry surface

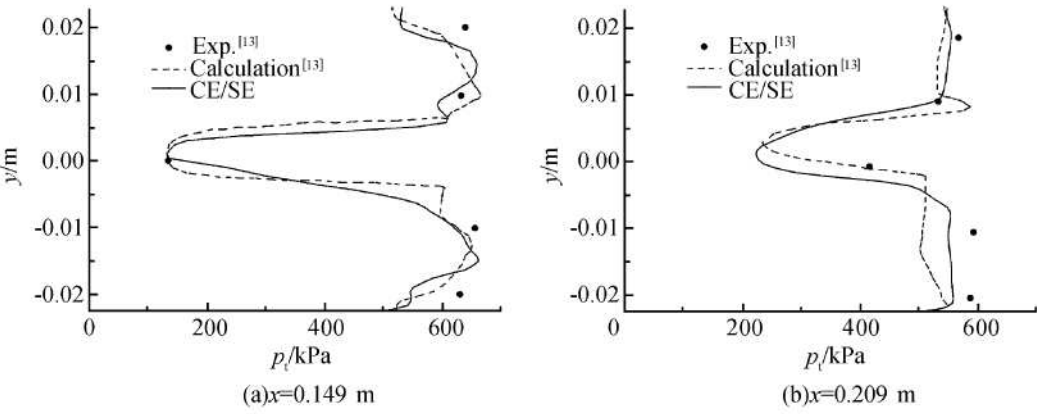


Fig 4 Total pressure profile on the symmetry surface

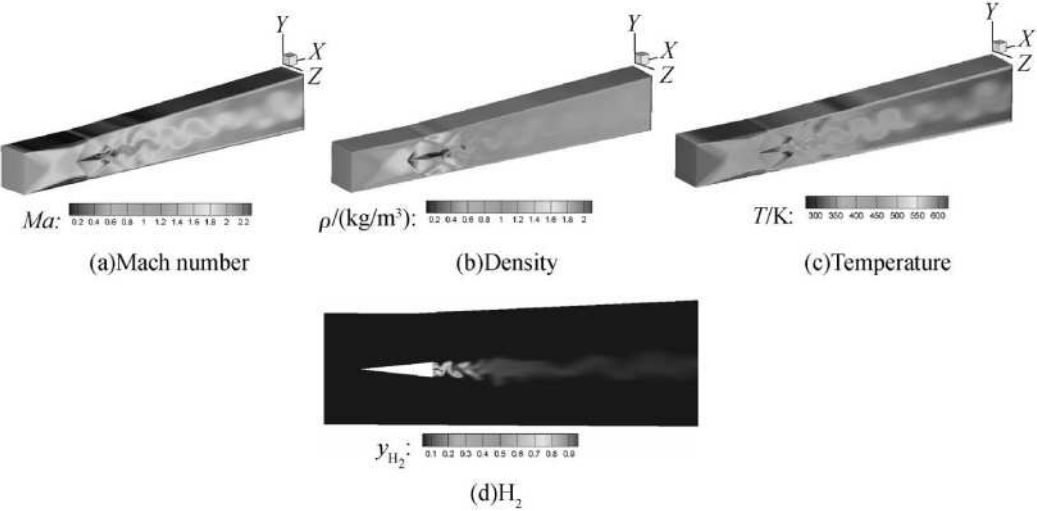
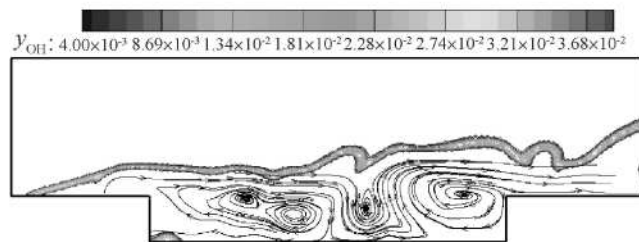


Fig 5 Aerodynamic parameter contour

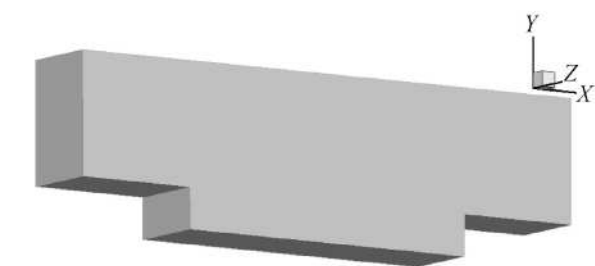
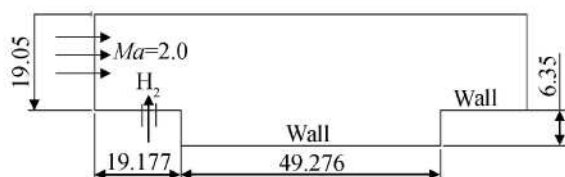
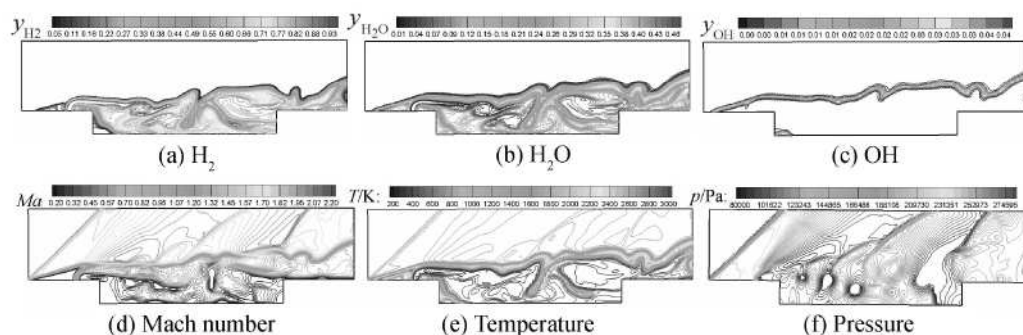
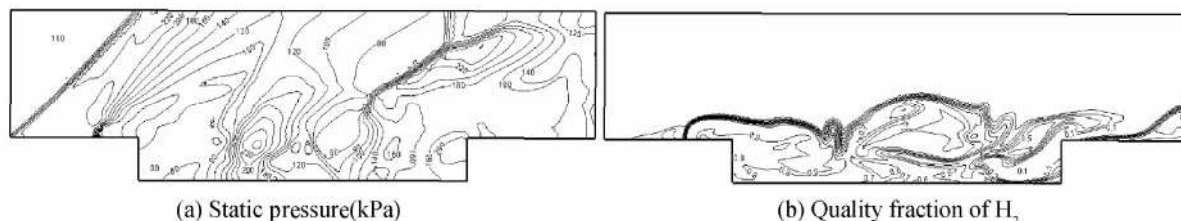
Table 2 Inlet boundary conditions

Boundary parameter	Boundary type	
	H ₂	Air
p/kPa	317	101.325
T/K	253	1100
Ma	1.0	2.0
$U/(\text{m/s})$	665	1330
H ₂	1.0	0.0
N ₂	0.0	0.7
O ₂	0.0	0.3

**Fig 7 Stream line**

为了研究不同长深比凹槽对燃烧的影响, 本文还对 $L/D = 3$ 的开放型凹槽和 $L/D = 15$ 的闭合型凹槽进行了数值模拟。图 10 给出了 $L/D = 3$ 凹槽燃烧室对称面流场图, H₂ 没有充满整个凹槽, 只是分布在凹槽后壁面附近区域, 这不利于 H₂ 和 O₂ 掺混; 与 $L/D = 7.76$ 的开放型凹槽相比, 凹槽中发生燃烧的区域比较小, 这是不利于火焰稳定。图 11 给出了 $L/D = 15$ 凹槽燃烧室对称面流场分布图, H₂ 充满整个凹槽, 凹槽长深比的增大, 在凹槽深度不变的情况下, 凹槽长度变大, 增大了凹槽内部低速回流区的范围, 有利于 H₂ 和 O₂ 充分掺混, 有利于驻留火焰。

本文计算中凹槽的深度都相同, $D = 6.35 \text{ mm}$, 长深比的变化是通过改变凹槽的长度来实现的。下面对不同长深比情况进行比较分析。对于 $L/D = 7.76$ 的凹槽, 如图 9(b) 所示, 燃料在流经凹槽时向凹槽内部偏转, 燃料流的下侧与凹槽后壁碰撞使得部分燃料直接进入凹槽。对于 $L/D = 15$ 的凹槽, 如图 11(b) 所

**(a) Computational domain****(b) Geometric parameters(unit:mm)****Fig 6 Flow model****Fig 8 Cavity combustion flow parameter contour; $L/D = 7.76$** **Fig 9 Flow parameter contour; $L/D = 7.76$**

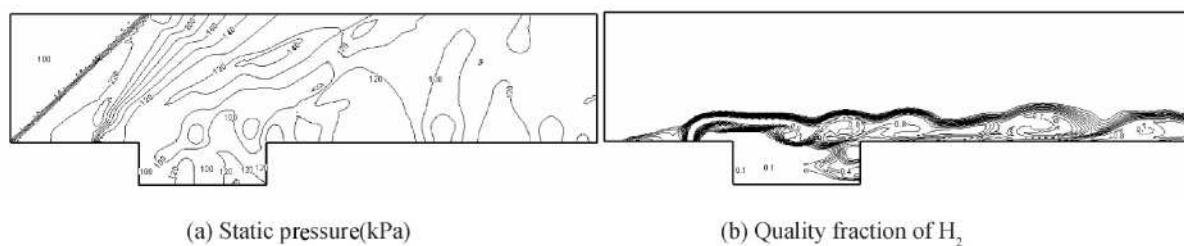


Fig 10 Flow parameter contour; $L/D = 3$

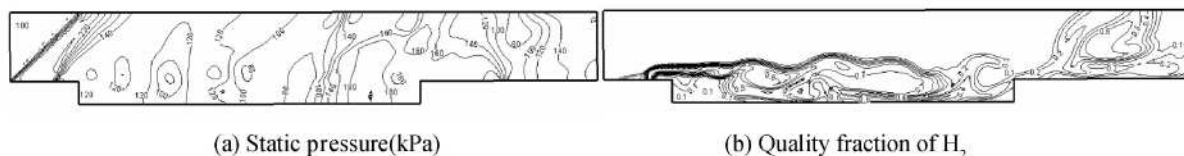


Fig 11 Flow parameter contour; $L/D = 15$

示,燃料流下侧与凹槽下壁发生碰撞,也使得燃料进入凹槽。对于 $L/D = 3$ 的凹槽,如图 10(b)所示,燃料流基本上横跨凹槽,与凹槽后壁发生碰撞的区域很小,只有后壁附近区域有少量燃料,燃料浓度相对较低。从图 9(a)和图 10(a)的静压分布图比较,可以看出,当凹槽长深比增大时,凹槽内部前壁附近的静压降低,这也说明燃料在流经凹槽时更容易向凹槽内部偏转;从 H_2 质量分数图上也可以看出,图 9(b)中凹槽前壁附近的 H_2 质量分数是 0.8,图 10(b)中凹槽前壁附近的 H_2 质量分数只有 0.1,图 9(b)中凹槽内部的 H_2 质量分数最高达到 0.9,图 10(b)中凹槽内部 H_2 质量分数最高只有 0.4。可见,改变凹槽长深比,对于凹槽内氢气的浓度影响较大。

采用 $L/D = 3$ 、 $L/D = 7.76$ 和 $L/D = 15$ 的凹槽得到的总压损失分别是 0.276、0.262、0.714。可见, $L/D = 3$ 和 $L/D = 7.76$ 的开放型凹槽总压损失基本相同,而采用 $L/D = 15$ 的闭合型凹槽总压损失非常大,所以,在实际的凹槽设计中,在满足火焰稳定的前提下不应采用更长的凹槽。

5 结 论

本文发展了基于时空守恒 CE/SE 数值方法的化学反应流动的三维计算程序,给出了化学反应源项、并行计算分区和并行边界的处理方法。采用 METIS 把计算域划分成若干个计算子域,在基于 MPI 的高性能并行计算服务器上完成计算。进行凹槽燃烧流动的数值研究之前对发展的三维 CE/SE 化学反应流动计算程序完成了验证计算,然后利用 CE/SE 方法和 H_2/O_2 的 8 组分 34 基元化学反应模型,研究了超

声速流场中不同长深比对凹槽燃烧流动的影响,得到的主要结论如下:

(1) 超声速燃烧室中凹槽内部形成一个低速回流区,有助于增加燃料的驻留时间和凹槽内的火焰区范围,从而增强火焰的稳定性。

(2) 凹槽长深比是影响火焰稳定性能的重要几何参数,增加凹槽的长深比可以扩大凹槽内部低速回流区的范围,有助于增加燃料的驻留时间和凹槽内的火焰区范围,从而增强火焰的稳定性。选择合适长深比凹槽要根据实际的燃烧室情况而定。

上述计算结果表明,CE/SE 格式对三维凹槽流场的数值模拟是成功的,数值模拟的结果有助于认识凹槽的火焰稳定器机理,为超声速燃烧室凹槽的流场分析和设计提供一定的参考数据。

参考文献:

- [1] Chang S C. A new numerical framework for solving conservation laws— the method of space-time conservation element and solution element[R]. NASA TM 104495, 1991.
- [2] Wang X Y, Chung S C. A 3-D non-splitting structured/unstructured Euler solver based on the space-time conservation element and solution element method[R]. AIAA 99-0904.
- [3] Zhang Z C, Yu S T, Wang X Y, et al. The space-time CE/SE method for the Navier-Stokes equations in three spatial dimensions[R]. AIAA 2000-2331.
- [4] Loh C Y, Hultgren L S, Chang S C. Noise computation of a supersonic shock-containing axisymmetric jet by the CE/SE method[R]. AIAA 2000-0475.
- [5] Yu S T, Chang S C. Application of the space-time con-

- servation element/solution element method to unsteady chemically reacting flows[R]. *AAA* 97-2099.
- [6] Wu Y, Yang V, Chang S C. Space-time method for chemically reacting flows with detailed kinetics[C]. *Kyoto Proceedings of the First International Conference on Computational Fluid Dynamics*, 2000
- [7] Hao H. Direct calculations of one-, two-, and three-dimensional detonations by the CESE method[R]. *AAA* 2005-229
- [8] Zhang Z C, Yu S T, Hao H. Direct calculations of two- and three-dimensional detonations by an extended CE/SE method[R]. *AAA* 2001-0476
- [9] 陈永刚, 何立明, 刘建勋. 时空守恒元和解元方法的爆轰波一维数值模拟 [J]. 推进技术, 2005, 26(3). (CHEN Yong-gang HE Liming LU Jian-xun One-dimensional numerical simulation of detonation waves based on space-time conversation element and solution element method[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2005, 26(3).)
- [10] Brown P N, Byrne G D, Hindmarsh A C. A variable coefficient ODE solver[J]. *SIAM J. Sci Stat Comput*, 1989, 10: 1038~1051
- [11] Kee R J, Miller J A. Chemkin-II: A fortran chemical kinetics package for the analysis of gas-phase chemical kinetics[R]. *SAND* 89-8009B, 1989
- [12] Zhang Z C, Wang X Y, Chang S C. The CE/SE method for Navier-Stokes equations using unstructured meshes for flows at all speeds[R]. *AAA* 2000-0393
- [13] Ullrich E, Wolfgang W K. Numerical investigation of turbulent reacting flows in a scram jet combustor model[R]. *AAA* 2002-3572

(编辑: 梅 瑛)

(上接第 28 页)

面上雷诺剪切应力 $\overline{u'v'}$ 的径向分布。图 16 中各截面 $\overline{u'v'}$ 的分布规律大体上与图 15 相同, 但由于燃气温度的升高, 使整个流场中的脉动加强, $\overline{u'v'}$ 变化量增加。

5 结 论

(1) 在相同试验条件下, 主燃孔参数变化对燃烧室内冷态和热态流场都有较大的影响。采用主燃孔 B 的回流区轴向尺寸 L_B 最小, 采用主燃孔 C 的回流区轴向尺寸 L_B 最大。

(2) 由于燃烧使流场中气流各参数如密度、成分、温度等发生了变化, 从而引起了湍流度加强, 脉动速度加大, 故燃烧流场中轴向脉动速度和雷诺平均应力比冷态有所增加。气体粘性增加, 使逆压力梯度增加, 从而导致回流区长度的减小。

参考文献:

- [1] Fureby C, Grinstein F F, Li G, et al. An experimental and computational study of a multi-swirl gas turbine combustor [J]. *Proceeding of the Combustion Institute*, 2007, 31(2): 3107~3114
- [2] El-Kady A M. The influence of primary air jets on flow and pollutant emissions characteristics within a model gas turbine combustor[R]. *AAA* 2006-544
- [3] Reddy A P R, Sujith R I, Chakravarthy S R. Swirler flow field characteristics in a sudden expansion combustor geometry using PIV [R]. *AAA* 2005-217
- [4] Linck M, Gupta A K. Effect of swirl and combustion on flow dynamics in luminous kerosene spray flames[R]. *AAA* 2003-1345
- [5] 郁 炜, 臧述升, 周广见. 燃烧流场测量的 PIV 应用初步研究 [J]. 燃气轮机技术, 2002, 15(4): 39~41
- [6] 杨浩林, 赵黛青, 杨卫斌. 扩散燃烧流场的 PIV 测试方法探讨 [J]. 工程热物理学报, 2007, 28(2): 233~236
- [7] Liu Y, Hayashi S, Liu W. Experimental and numerical investigations on flow characteristics in a double-swirl combustor[R]. *AAA* 97-0708
- [8] 党新宪, 赵坚行, 吉洪湖. 试验研究双旋流器头部燃烧室几何参数对燃烧性能的影响 [J]. 航空动力学报, 2007, 22(10): 1639~1645
- [9] 党新宪, 赵坚行, 吉洪湖. 双旋流器燃烧室 NO_x 生成研究 [J]. 航空动力学报, 2008, 23(3): 430~435
- [10] Gupta A K, Lilley D G, Syred N. Swirl flows[M]. *England: Abacus Press Kent*, 1984

(编辑: 梅 瑛)