

文章编号: 1000-8055(2009)05-1006-05

共振型 PDE 谐振腔喷嘴匹配关系研究

姜日红¹, 武晓松¹, 王 栋²

(1. 南京理工大学 机械工程学院, 南京 210094)

(2. 北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100191)

摘 要: 在数值模拟的基础上分析了两种不同形状的喷嘴: 细长孔喷嘴(或称狭缝喷嘴)和环形喷嘴对于射流碰撞和激波形成以及聚焦的影响. 在此基础上又以环形喷嘴为例, 分析了喷嘴尺寸对于射流碰撞和激波形成聚焦的影响, 得出环形喷嘴相对于细长孔喷嘴具有更好的聚焦效果, 以及有效利用激波起爆爆震波的喷嘴与谐振腔的几何匹配关系.

关 键 词: 共振型 PDE (脉冲爆震发动机); 谐振腔; 喷嘴; 爆震波; 数值模拟

中图分类号: V235.22

文献标识码: A

Matching research of resonant PDE's resonator and jet

JIANG Ri hong¹, WU Xiao song¹, WANG Dong²

(1. School of Mechanical Engineering,

Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

(2. School of Jet Propulsion,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: This paper analyzed the influence of nozzle shape (slot and annular nozzles) and nozzle size (four different annular nozzles) on jet collision, shock forming and focus based on numerical simulation. It's learnt that annular nozzle's focus effect is better than slot nozzle, and the geometry matching relationship of resonator and nozzle could help ignite the detonation wave by using shock.

Key words: resonant PDE (pulse detonation engine); resonator; nozzle; detonation wave; numerical simulation

共振型脉冲爆震发动机是由 Levin^[1]等人提出的一种基于激波在谐振腔内聚焦点火从而直接起爆爆震波的新型脉冲爆震发动机, 与传统的直管脉冲爆震发动机^[2]相比, 由于其没有点火器、供气阀等装置的限制, 故其爆震频率理论上可以高于 1 000 Hz.

共振型脉冲爆震发动机的工作原理为^[2]: 入流燃料先流入谐振腔壁室中, 此时一方面对工作中的谐振腔进行冷却作用, 一方面提高燃料本身

的温度, 后沿着反应室内壁的环绕管道进入喷射器喷射出, 与来流空气混合, 在反应室里进行预反应, 产生大量活化能较低的活化基, 经过预反应加热后的产物压缩减速后具有一定的压力, 从喷嘴流入谐振腔, 形成超声速射流. 超声速的射流在谐振腔中心相遇后碰撞形成激波并向谐振腔内壁传播, 与内壁碰撞反射后在焦点聚焦, 形成高温高压点, 从而点燃混合物. 由于在焦点处具有很高的点火能量, 足以直接起爆并形成爆震波, 而没有

收稿日期: 2008-08-28; 修订日期: 2008-12-08

基金项目: 江苏省普通高校研究生科研创新项目(CX07B163Z)

作者简介: 姜日红(1981-), 女, 山东烟台人, 博士生, 主要从事脉冲爆震发动机研究. E-mail: jrh2003@yahoo.com.cn

DDT (爆燃向爆震转变) 过程. 最后爆震波从谐振腔里发展传播出去, 同时对推力壁产生极大的推力. 当爆震波离开谐振腔后形成的一系列膨胀波对室内降温降压并将燃烧产物排出谐振腔, 到此一个循环结束, 进行下一个循环. 由上述工作原理可知, 超声速射流是激波形成的前提和关键因素. 因此完成谐振腔与喷嘴的合理匹配至关重要^[3].

1 物理模型和数学模型

1.1 物理模型

共振型脉冲爆震发动机的模型如图 1 所示^[1]. 为了分析喷嘴形状对于射流的影响, 我们选择了两种不同形状的喷嘴进行对比, 一种是细长孔 (或称狭缝) 喷嘴 (见图 2(a)), 其喷嘴由两个对称的细长的狭缝组成, 形成两股单向的相互对撞的超声速射流. 一种是环形喷嘴 (见图 2(b)), 与细长孔喷嘴所不同的是, 环形喷嘴的喷口较短, 环绕谐振腔周向分布, 形成多向对撞的超声速射流, 通过两者之间的对比弄清射流与射流之间的相互影响和耦合作用以及喷口长短对于超声速射流的影响.

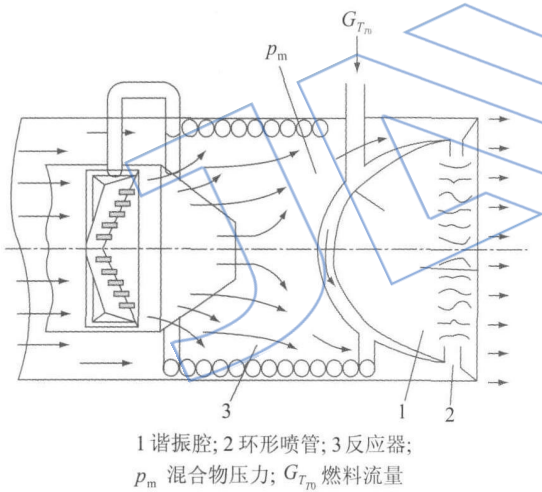


图 1 共振型脉冲爆震发动机的物理模型
Fig. 1 Physical model of resonator pulse detonation engine

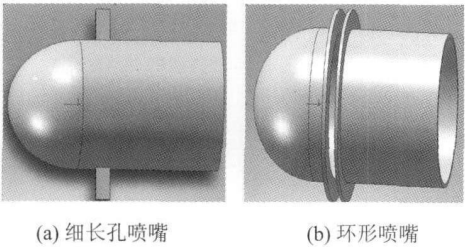


图 2 两种不同形状喷嘴的谐振腔结构示意图
Fig. 2 Schematic of resonator with slot jet

1.2 数学模型

1.2.1 控制方程

采用圆柱坐标系下的二维雷诺平均 N-S 方程. 从以往的数值模拟文献可知, 计算爆震燃烧的控制方程一般都采用欧拉方程, 不考虑粘性. 文献 [4-5] 指出, 当网格足够密时, 物理扩散的作用变大, 而数值扩散的作用变得可以忽略, 此时如果继续采用欧拉方程进行数值计算, 容易引起非物理解的产生, 因此有必要采用 N-S 方程进行爆震燃烧的数值模拟.

为了方便起见, 这里只给出单组分控制方程组

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial (r \mathbf{G})}{\partial r} - \frac{1}{r} \mathbf{P} = \mathbf{S}$$

其中

$$\mathbf{U} = \begin{pmatrix} \rho \\ \rho Y_i \\ \rho u \\ \rho v \\ E \end{pmatrix}, \mathbf{F} = \begin{pmatrix} \rho u \\ \rho Y_{iu} \\ \rho u^2 \\ \rho uv \\ u(E+p) \end{pmatrix}, \mathbf{G} = \begin{pmatrix} \rho v \\ \rho Y_{iv} \\ \rho uv \\ \rho v^2 \\ v(E+p) \end{pmatrix}, \mathbf{P} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ p \\ 0 \end{pmatrix}, \mathbf{S} = \begin{pmatrix} 0 \\ \omega_i \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

其中 ρ 为组分密度; u, v 为 x, r 向的速度; E 为单位体积总能; ω_i 为组分 i 的单位体积的质量生成率.

1.2.2 数值计算方法

爆震波的非定常特性使得数值模拟的工作变得十分复杂. 由于此模型涉及高速可压流, 对于移动波的捕捉精度要求较高, 网格划分非常精细, 图 3 所示为网格计算模型, 故采用耦合显式求解模型^[6]; 由于该模型流动涉及 Re 数较大的紊流, 故采用 $k-\epsilon$ 两方程湍流模型^[7]; 由于爆震波反应速度极快, 内流场瞬息万变, 故采用对于瞬态问题计算较好的 PISO 算法^[8], 离散格式采用具有较高精度的二阶迎风格式.

边界条件设置: 壁面边界条件均为绝热无滑移壁面; 喷嘴入口设置为压力入口, 需要给定进口的总温、总压和静压; 出口处设置为无限远处压力出口条件. 为了简化计算, 将中心轴线设置为对称边界, 这样只计算上半部分即可. 由喷嘴所射入的气体为氢气与空气的混和物, 其化学当量比为 $H_2 : O_2 : AR = 2 : 1 : 7$ (摩尔比), 化学反应模型采用 chemkin 详细化学反应模型.

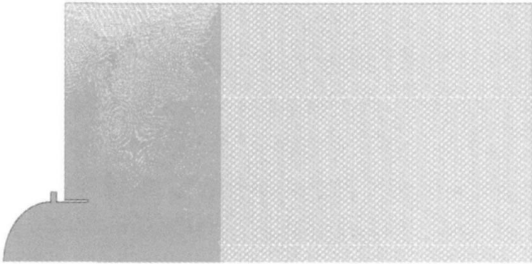


图 3 网格计算模型

Fig. 3 Model of mesh calculation

2 计算结果分析

2.1 细长孔喷嘴

根据上述计算方法对模型进行数值模拟, 计算中改变的参数有: 入口燃气的温度, 变化范围为 250~ 500 K, 压力的变化范围为 0. 1~ 0. 5 MPa, 相应的总温的变化范围为 300~ 600 K, 总压的变化范围为 0. 18~ 0. 9 MPa. 这样的入口温度和压力在工程上是比较容易实现的, 然而数值模拟的结果显示, 在上述的入口条件下均没能点燃并引爆氢气和空气的混合物, 计算结果如图 4 所示(以结果较好的入口温度为 400K, 压力为 0. 45MPa 为例).

由图 4 可知, $t=77\mu\text{s}$ 时, 由细长孔即狭缝喷口射入的超声速射流在中心处相撞, 撞击产生的激波压力大约为 0. 23 MPa, 温度约为 401K, 说明射流对撞形成的激波能量较弱; $t=115\mu\text{s}$ 时, 入射激波和反射激波相互作用, 在壁面附近产生一个高温高压区域, 该区域的压力约为 0. 405 MPa, 温度为 493 K, 从组分图看并没有反应产物水的生成, 因此化学反应并未开始; $t=117\mu\text{s}$ 时, 高温高压区域的压力、温度继续下降, 压力降为 0. 342 MPa, 温度降为 470K, 说明化学反应始终没有进行, 激波产生的高温高压区域的能量缺少后续能量的补充开始下降, 由此可见, 细长孔喷嘴射入的超声速射流所形成的激波能量在氢气与空气燃料中不足以直接点燃并起爆爆震波.

2.2 环形喷嘴

入口温度和压力变化范围同 2.1 节所述, 模拟结果显示: 当温度为 300K, 压力为 0. 35 MPa 以上时, 超声速射流所形成的激波聚焦所产生的能量足以成功起爆爆震波. 图 5 所示为爆震波形成过程中几个关键时刻的流场参数变化和分布情况(以喷嘴直径 $d=4\text{mm}$, 入口温度 300K, 入口压力 $4.5\times 10^5\text{Pa}$ 为例).

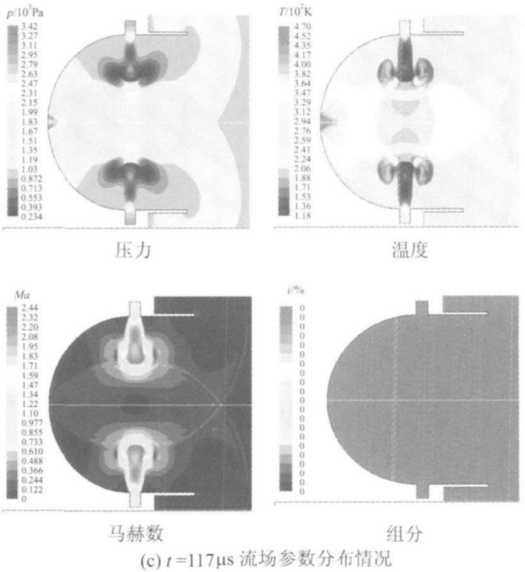
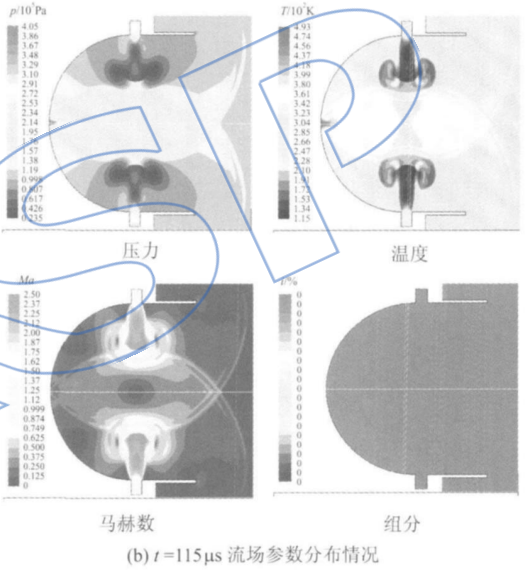
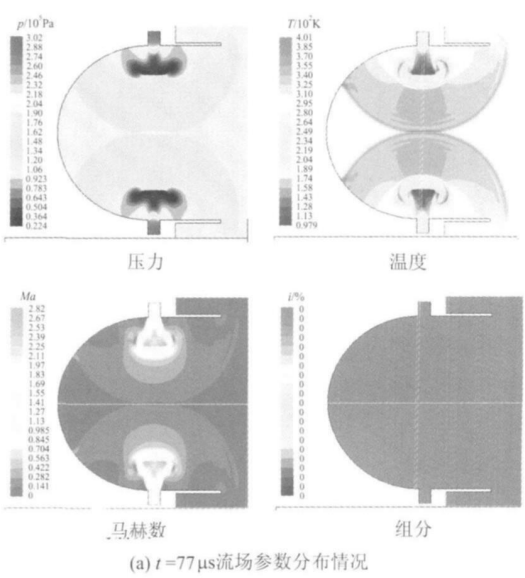


图 4 几个典型时刻流场参数分布情况

Fig. 4 Parameters of flow at some typical time

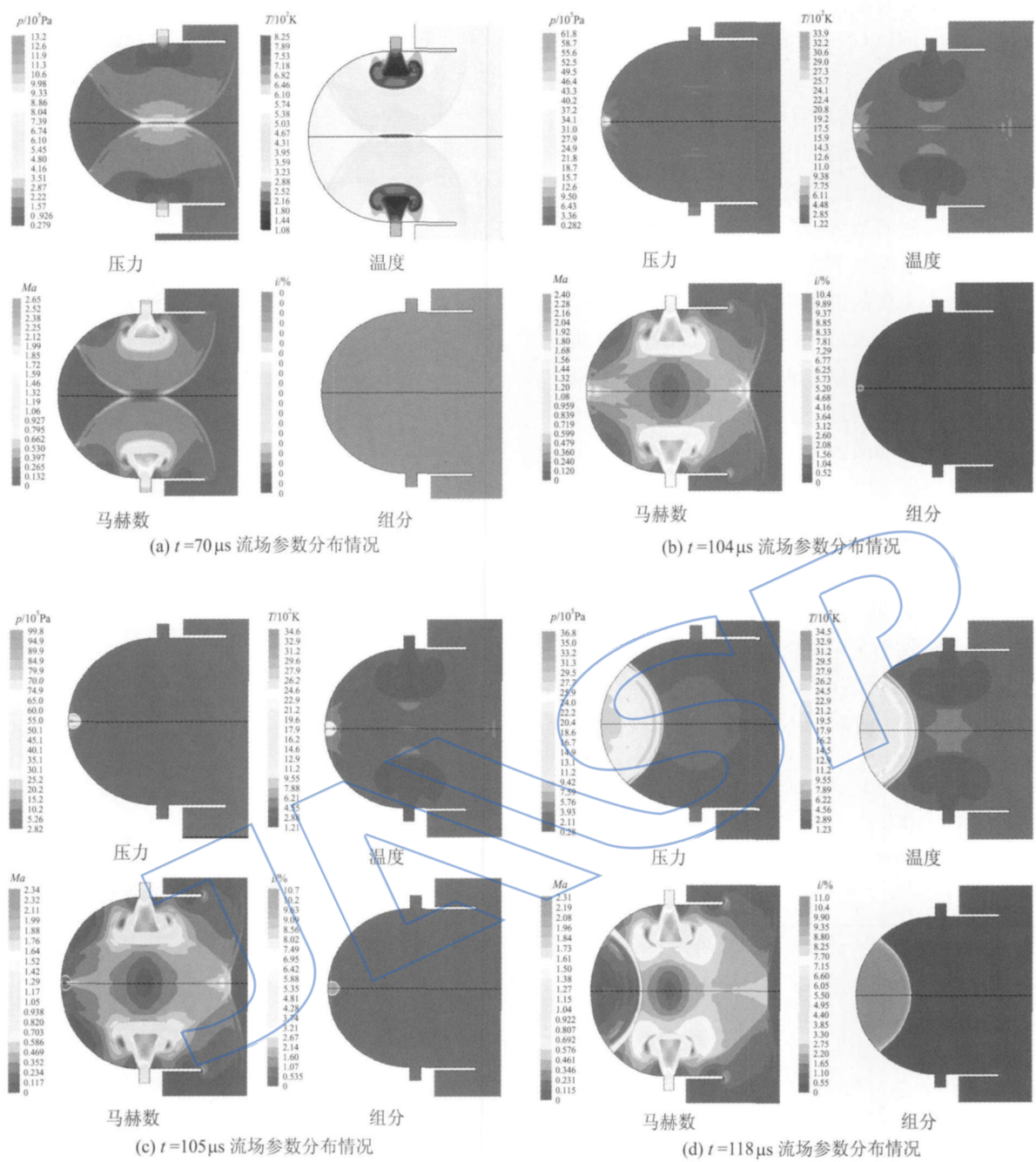


图 5 不同时刻流场参数分布情况

Fig. 5 Parameters of flow at different time

由图 5 可以看出, $t = 70 \mu s$ 时, 由环形喷嘴射入的超声速射流在中心处相撞, 撞击产生的激波压力大约为 1.32 MPa, 温度约为 825 K, 远大于细长孔喷嘴所产生的激波压力和温度; $t = 104 \mu s$ 时, 入射激波和反射激波在焦点处聚焦, 所形成的热点压力约为 6.18 MPa, 温度为 3390 K, 组分图开始显示有反应产物水生成, 说明激波聚焦所产生的高能量已将可爆震混合物成功点燃, 燃料化学反应已经开始进行; $t = 105 \mu s$ 时, 聚焦点附近压力、温度继续上升, 压力达到 9.98 MPa, 温度

达到 3460 K, 水的含量也继续增加, 说明化学反应仍在进行, 随着燃烧反应的持续进行, 不断有新的能量填充进来, 使得反应越来越剧烈, 能量持续增加, 氢气与空气的可爆震混合物已成功起爆; 由图 5(d) 可知, 已成功起爆的爆震波以球形波的形式向外传播, 在传播的过程中, 压力、温度略有下降, 传播速度略有上升, 反应产物的含量逐渐增加, 说明爆震波在后续反应能量的支持下平稳向前发展。

由图 4 和图 5 对比可知, 虽然细长孔喷嘴喷

入超声速射流的最高马赫数大于环形喷嘴,由图 4(a)和 5(a)可以看出,前者的最高马赫数达到 2.82,而后者为 2.65,但最后形成的激波能量,前者远远小于后者,从最后能否起爆可爆震混合物的结果可以明显看出.由此可见,单一方向较强射流对撞所形成激波能量要远小于多方向较弱射流对撞所形成激波能量,即不同方向的射流与射流之间的相互碰撞对于能量有叠加增强作用.

另外本文在数值模拟中发现,聚焦点位置与有关文献有点出入,文献[9]认为激波经过壁面发射后在谐振室圆心处聚焦,而本文在数值模拟中发现焦点在壁面附近,这主要是因为气流在圆心碰撞时所产生的激波并不是以圆形传播,而是以扁椭圆形传播,从而引起聚焦点的位置改变.

2.3 几何尺寸对于射流的影响

以环形喷嘴为例,为了分析喷嘴几何尺寸对于射流的影响,将谐振腔的内径固定为 60 mm,喷嘴直径分别取 2, 3, 4, 6 mm,在入口压力 $p_{in} = 0.5$ MPa,入口温度 $T_{in} = 300$ K,环境温度 $T_a = 300$ K 时,几个转折点的时间及流场特征参数如表 1 所示.

表 1 直径比对谐振腔内流场参数的影响
Table 1 Influence of diameter rate on flow parameters in the resonator

工作状态	D/d			
	60/6= 10	60/4= 15	60/3= 20	60/2= 30
进 时刻/ μ s	11	10	11	9.8
入 速度/(m/s)	387	394	420	425
碰 撞	时刻/ μ s	68	70	74
	压力/MPa	1.3	1.32	0.8
	温度/K	822	825	658
聚 焦	时刻/ μ s	101	104	106
	压力/MPa	2.31	3.17	1.93
	温度/K	1170	1350	966

由表 1 可知,随着喷嘴内径逐渐变大,射流进入谐振腔的时间逐渐变长,射流的速度也逐渐降低,这与流体力学的基本原理与性质一致,当流孔两边的压差相同时,流孔直径越小,射流速度越大.随着喷嘴直径的变大,射流碰撞时间先变长后变短,碰撞所产生的激波的压力和温度先增大后减小,当喷嘴直径 $d = 4$ mm 时,射流碰撞和聚焦所形成的激波强度最强(如表 1 所示温度和压力最高),其主要原因是当 $d = 4$ mm 时,谐振腔内谐

振效果最好.谐振的来源主要有两个:一是腔的声学谐振;二是射流之间的相互作用和射流的不稳定性引起的振动.前者与谐振腔的结构有关,而后者与谐振腔的结构和压力都有关系.当 $d = 4$ mm 时,射流碰撞所形成的激波强度最强说明此时喷嘴与谐振腔的匹配关系最好.

3 结 论

由以上数值模拟和理论分析结果可以得到以下结论:

- 1) 细长孔喷嘴的共振型 PDE(脉冲爆震发动机),在工程上易于实现的入口条件下均没能引爆氢气和空气的混合物,其主要原因是射流所诱发的激波和反射波的强度不够,使得聚焦能量不足以直接点燃并起爆爆震波.
- 2) 环形喷嘴的共振型 PDE,在温度为 300 K、压力为 0.35 MPa 以上时,均能成功起爆爆震波.这说明环形喷嘴比细长孔即狭缝喷嘴对超声速射流所形成的激波的聚焦效果要好.
- 3) 对于环形喷嘴,当喷嘴与谐振腔的内径比为 60/4 = 15 时,射流碰撞和聚焦所形成的激波强度最强,谐振腔的谐振效果最好.

参考文献:

[1] Levin V A, Nechaev J N, Tarasov A I. A new approach to organizing operation cycles in pulse detonation engines. High speed deflagration and detonation[R]. ADA406683, 2001: 223-238

[2] 严传俊,范玮. 脉冲爆震发动机原理及关键技术[M]. 西安:西北工业大学出版社, 2005

[3] McManus K R, Anthony J. Dean experimental evaluation of a two-stage pulse detonation combustor[R]. AIAA 2005-3773

[4] Bauwens L, Williams N D. Computation and visualization of detailed detonation structures[R]. AIAA 1996-0343

[5] Singh S, Powers J M, Paolucci S. Detonation solution from reactive navier-stokes equations[R]. AIAA 1999-0966

[6] 王福军. 计算流体力学分析 CFD 软件原理与应用[M]. 北京:清华大学出版社, 2004

[7] 章梓雄,董曾南. 粘性流体力学[M]. 北京:清华大学出版社, 1998

[8] Anderson J D Jr. 计算流体力学入门[M]. 北京:清华大学出版社, 2002

[9] Leyva I A, Tangirala V. Investigation of unsteady flow field in a 2-stage PDE resonator[R]. AIAA 2003-71