

旋转爆轰燃烧室结构及稳定性研究

苗森¹, 邓博阳², 郑洪涛²

(1. 海军装备部, 西安 710021; 2. 哈尔滨工程大学 动力与能源工程学院, 哈尔滨 150001)

摘要: 基于二维可压欧拉方程, 对充有当量比为1的氢气/空气预混气的不同结构燃烧室进行数值计算。研究了爆轰波在不同坡度燃烧室内的传播过程, 分析了燃烧室内不同波头数目对其性能的影响。研究表明: 在燃烧室入口端采用适当的楔形结构, 有助于提高沿单一方向传播的爆轰波的强度, 提高燃烧室做功能力; 当燃烧室周向尺寸较大时, 同时起爆双波头有助于提高其工作的稳定性。

关键词: 燃气涡轮; 低污染燃烧室; 旋转爆轰; 障碍物; 双波头; 增压比

中图分类号: V231.3 文献标识码: A 文章编号: 1672-2620 (2015) 05-0006-08

Research on the structure and stability of rotating detonation combustor

MIAO Miao¹, DENG Bo-yang², ZHENG Hong-tao²

(1. Naval Equipment Department, Xi'an 710021, China; 2. College of Power and Energy Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: Based on the two dimensional compressible Euler Equation, the numerical simulation on combustor with different structures was carried out. The fuel in the combustor was H₂/air premixed gas and the equivalent ratio was 1. The propagation process of detonation wave in combustor with different slope entrances was studied, and the effect of different wave numbers on the combustor performance was analyzed. The results show that the appropriate slope for the combustor entrance can increase the intensity of the detonation wave which propagates along a single direction, and increase the working capacity of combustor. Initiating double detonation wave at the same time can improve the working stability of combustor when its circumferential size is lager.

Key words: gas turbine; low emission combustor; rotating detonation; obstacles; double detonation wave; pressure ratio

1 引言

目前的燃气涡轮装置中, 均采用等压模式来组织燃烧。但经过几十年的研究和发展, 采用这种燃烧方式的发动机的效率难以再产生新的飞跃, 而且随着科技的进步以及对其性能要求的逐步提高, 等压燃烧 NO_x 排放高、火焰长度长以及阻力损失大等缺点也日益凸显。所以, 发展可增压的低排放高效燃烧室, 是解决目前问题的一个有效途径。与传统的发动机燃烧室相比, 旋转爆轰燃烧室因结构简单、污染小及能量转化率高等优点, 受到越来越多的青

睐^[1]。

上世纪50年代, Voitsekhevskii 等^[2]就利用乙炔/氧气的混合气, 在圆盘形实验装置中成功实现了旋转爆轰, 并且利用速度补偿的观测方法, 对爆轰波的结构进行了研究, 分析了爆轰波在流场中的传播特性。2000年, 美国普惠公司^[3]分别采用非预混和预混的方式, 对乙炔/氧气的旋转爆轰燃烧室进行了实验研究, 成功实现了波速为 2 500 m/s 的旋转爆轰。Wolanski 等^[4-5]对贫燃状态下氢气与空气的混合气所引发的旋转爆轰进行了实验测试, 分析了爆轰燃烧

收稿日期: 2015-05-15

作者简介: 苗森(1985-), 女, 陕西横山人, 工程师, 硕士, 主要从事燃气轮机技术研究工作。

的性质,研究了爆轰波传播速度与采用初始条件之间的关系。Kindracki等^[6-8]在长1 325 mm、直径128.5 mm的管道中,实验研究了点火位置对以甲烷/空气为推进剂的爆轰燃烧室特性的影响,发现在管道中心部位点火会获得更大的爆轰压力。Yi等^[9]研究了不同形状和尺寸尾喷管对旋转爆轰燃烧室性能的影响,发现当燃烧室尾喷管长0.04 m、扩张角10°时燃烧室性能最好。

随着人们对旋转爆轰发动机关注的增加,我国也对其进行了一系列实验研究。姜孝海等^[10]对旋转爆轰燃烧室内从点火到形成稳定旋转爆轰的整个过程进行了研究,详细分析了爆轰波在燃烧室内能稳定自持传播的关键原因。张旭东等^[11-15]对旋转爆轰燃烧室进行了二维和三维数值研究,分析了稳定爆轰流场特征,研究了爆轰波结构及爆轰波在传播过程中泰勒稀疏波对其波阵面的影响。周蕊等^[16-17]采用追踪粒子轨迹的方法,对旋转爆轰燃烧室的热力学循环过程进行了研究,其计算结果与理想的ZND模型吻合良好,热力学循环热效率为35.41%。邵业涛等^[18-20]采用两步化学反应模型,对连续旋转爆轰燃烧室进行数值模拟,分析了燃料入射速度对爆轰波传播过程的影响,表明当燃烧室入口处的喷射速度超过C-J速度时,旋转爆轰流场中的爆轰波呈现出驻定状态。随后,考虑到在同轴圆管内产生爆轰波时内部的散热问题,提出了无内柱的连续旋转爆轰燃烧室模型,并对爆轰燃烧室出口处采用不同尾喷管的情况进行了研究,表明加装拉瓦尔喷管时燃烧室的工作性能最好。

总体而言,国内外对旋转爆轰燃烧室的研究,主要集中在爆轰波的形成过程及流场结构等方面,对燃烧室的结构及其工作过程的稳定性还鲜有研究。基于目前的研究现状,本文通过数值模拟方法,将燃烧室入口端设计为楔形结构,研究了爆轰波在不同坡度燃烧室内的传播过程,并分析了波头数目对其工作稳定性的影响,可为充分利用旋转爆轰燃烧室的优势提供一定数据支持。

2 物理模型与计算方法

2.1 物理模型

连续旋转爆轰燃烧室为柱状环筒形燃烧室,其结构如图1所示。燃料经喷射孔进入燃烧室内,经高能点火后,会产生沿圆环方向的爆轰波,并能实

现绕轴方向的连续旋转传播。图2为爆轰波在爆轰燃烧室内的三维传播示意图,图中6示出了爆轰波的传播方向。爆轰波扫过的区域压力会有所降低,当其压力低于喷注压力时,可燃预混气就会进入燃烧室内,以维持爆轰波的稳定连续传播。

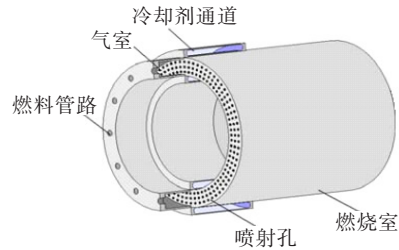
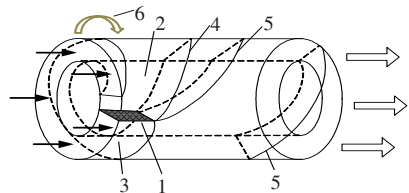


图1 旋转爆轰燃烧室三维结构示意图

Fig.1 The 3D structure of a rotating detonation combustor



1-爆轰波;2-爆轰产物;3-未燃预混气;
4-滑移线;5-斜激波;6-爆轰波传播方向

图2 爆轰波的三维传播示意图

Fig.2 The 3D propagation process of detonation wave

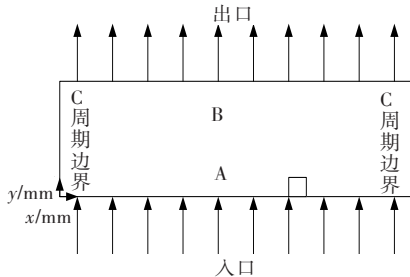
在一定条件下,与燃烧室直径相比,燃烧室厚度相对较小,所以可将其沿母线展开,形成如图3所示的计算域。其中,图3(a)为典型无障碍爆轰燃烧室的二维周向展开图,图3(b)为本文所采用的楔形爆轰燃烧室的周向展开图。

2.2 计算方法及边界条件

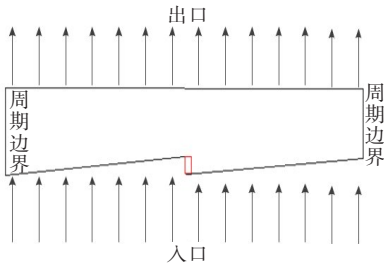
基于理想气体假设,所选取的反应物为氢气/空气按化学当量比进行预混的混合气,采用显式格式求解二维欧拉控制方程,忽略粘性、热传导和扩散等输运效应。化学反应模型为有限速率模型,反应速率常数采用Arrhenius公式计算。计算域内所采用的边界条件见表1。

2.3 模型验证

为验证模型的可靠性,将本文计算所得结果与文献中数值模拟结果进行分析。图4(a)和图4(b)分别为计算获得的温度场分布图、Douglas数值模拟中得到的旋转爆轰波基本结构,对比分析可发现二者吻合较好,能清晰观察到爆轰波后的胞格结构,K-H不稳定波(图4(b)中C处)也清晰可见,并且该结果与图4(c)中Bykovskii通过实验测量得到的内部流场结



(a) 无障碍旋转爆轰燃烧室



(b) 楔形旋转爆轰燃烧室

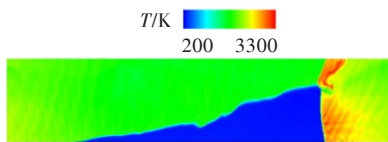
图3 计算域示意图

Fig.3 Computational domain

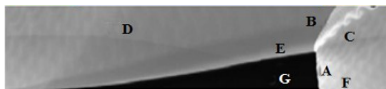
表1 计算域内各边的边界条件

Table 1 The boundary conditions in the computational domain

边界条件类型		设置方法
下边界	质量流量入口	根据入口压力自适应调整入口质量流量, 用udf实现
左右边界	周期边界	将左右两边设为周期边界
上边界	超声速出口	守恒变量由内部流场外推得到
	亚声速出口	边界点压力为外界背压, 其他变量均由内部流场外推得到



(a)



A-爆轰波; B-斜激波; C-滑移线; D-二次激波; E-预混气与燃烧产物的接触面; F-阻塞段; G-未燃气体



(c)

图4 达到稳定爆轰时的温度分布云图

Fig.4 Temperature contours at steady detonation state

构定性一致,说明计算方法可靠。

表2给出了数值模拟得到的爆轰波的计算值, 和利用CEA软件计算的同等条件下的爆轰波的理论值。可见,计算的传播速度比理论上的C-J速度小,其主要原因是燃烧室内旋转爆轰波的非受限特性。总体上讲,计算值与理论值吻合良好,验证了此数学模型的可靠性。

表2 计算值与理论值的对比

Table 2 The contrast between computation results and theoretical results

爆轰波	理论值	计算值	相对误差
传播速度/(m/s)	1 944	1 866	4.0%
峰值压力/MPa	6.09	5.80	4.8%

3 性能分析

3.1 楔形燃烧室流场分析

图5为在楔形爆轰燃烧室内,爆轰波传播一个周期过程中的压力变化云图。可见,此时的燃烧室内爆轰波基本达到稳定状态,爆轰波阵面的压力峰值为6.38 MPa,爆轰波在传播过程中与入口端的倾斜角并不固定。如图中所示,爆轰波在 $t = T_0$ 和 $t = T_0 + T/2$ 时的倾斜角,明显比 $t = T_0 + T/4$ 和 $t = T_0 + T/4$ 时

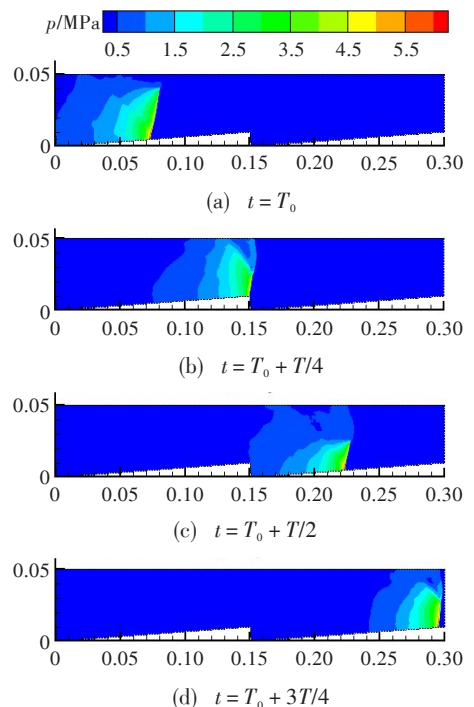


图5 楔形燃烧室内爆轰波传播一个周期的压力云图

Fig.5 Pressure contours of wedge shape combustor at a period

3T/4 时的大。这主要是因为爆轰波分别经过 $x=0$ 和 $x=0.15$ 位置时,燃烧室入口边界处存在着一个凸变,注入的燃料也会在这两个位置处产生一定间断,所以远离燃烧室入口端的爆轰波会因燃料供应不足而逐渐减弱;同时,爆轰波经过这两个位置时,也会先将远离燃烧室入口的燃料烧掉,所以爆轰波与入口边界的倾斜角会有所加大。随着爆轰波的传播,靠近燃烧室入口处的燃料供给充足,爆轰波的传播又会逐渐趋于平稳,其与燃烧室入口边界之间的夹角也逐渐减小,最终呈现出 $t=T_0+T/4$ 和 $t=T_0+3T/4$ 时的变化趋势。此外,靠近燃烧室入口处爆轰波的压力明显比远离燃烧室入口处的压力大,这主要是因为燃烧室入口端爆轰波受到了较大的壁面压缩作用。

图6为楔形燃烧室内基本达到稳定状态、爆轰波传播到 $550 \mu s$ 时,燃烧室内的温度、组分、密度及速度分布云图。从计算结果可知,此时爆轰波阵面处的温度峰值达 $3270 K$,密度峰值达 $6.47 kg/m^3$,速度峰值达 $1720 m/s$ 。从图中可看出,此时燃烧室内大部分入口端面上的压力都要小于喷注压力,从而使气流能源源不断地进入到燃烧室内,也更加有力

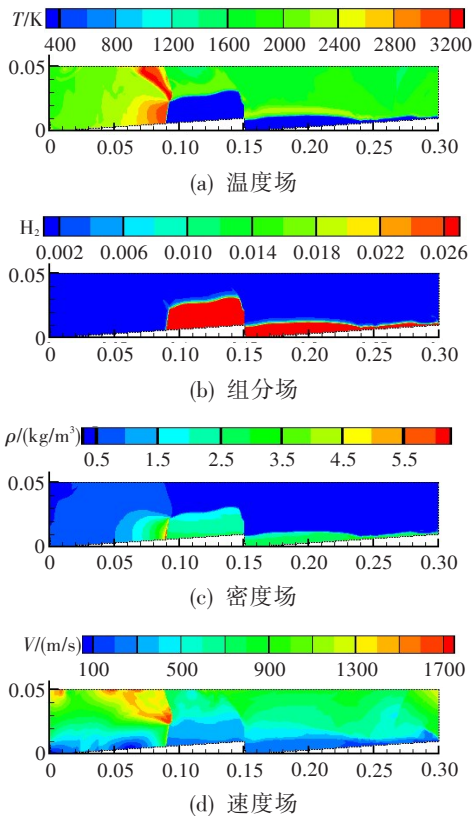


图6 楔形燃烧室达到稳定后的云图分布

Fig.6 The contours of wedge shape combustor at steady state

地保证了爆轰波在燃烧室内的稳定传播。在 $x=0.15 m$ 处,因为壁面的出现,使得燃烧室内的气体供应区变得不再规整和圆滑,从而导致燃烧室内气体的温度、密度及速度都出现了一定间断。但总体来看,这并不影响爆轰波在燃烧室内的传播。所以爆轰波能在楔形燃烧室内稳定传播,并围绕其壁面作连续旋转。

3.2 入口端坡度对燃烧室性能的影响

图7和图8分别为在不同坡度下燃烧室内爆轰波传播稳定时,燃烧室内的压力和温度分布云图。可见,随着燃烧室入口端坡度的逐渐增加,爆轰波强度逐渐增加,在燃烧室入口端尤为明显。这主要是因为随着燃烧室入口端坡度的增加,爆轰波受到壁面的压缩作用也逐渐增强,使得燃烧室入口端爆轰波的压力明显大于远离入口端爆轰波的压力。随着燃烧室入口端坡度的逐渐增加,燃烧室内新充入的

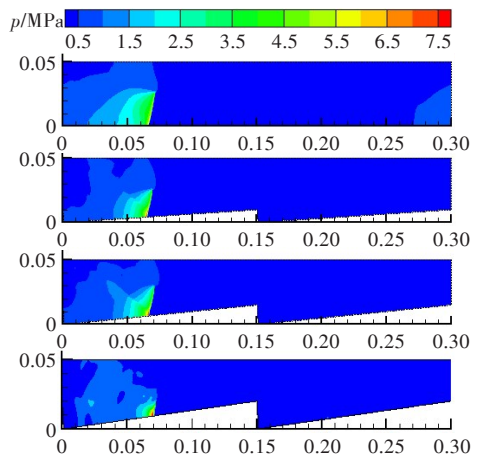


图7 不同坡度下的压力云图

Fig.7 Pressure contours with different slope entrances

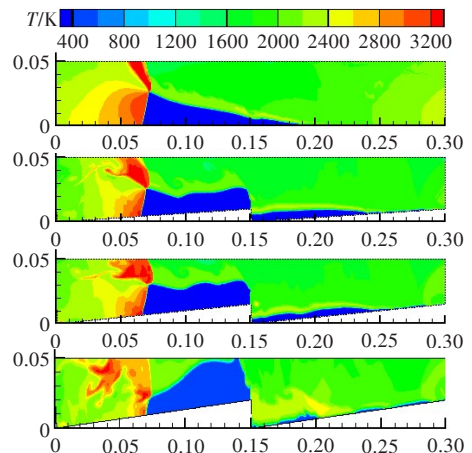


图8 不同坡度下的温度云图

Fig.8 Temperature contours with different slope entrances

预混气的区域变得不再规整,爆轰波后方斜激波所出现的区域也随着燃烧室入口端坡度的增加而变大且变得不太规整,楔形燃烧室内爆轰波后方出现的泰勒稀疏波的分布并不均匀,燃烧室入口处爆轰波的温度明显高于远离入口处爆轰波的温度。这是因为楔形燃烧室内入口端面处爆轰波的强度较大,以及爆轰波后方的爆轰产物会受到燃烧室入口端坡度的扰动作用。当燃烧室中间壁面高度达 20 mm 时,可看出此时燃烧室内的爆轰波虽然还可进行周期性连续旋转传播,但所形成的进气区域变得极不规整,爆轰波在燃烧室内的工作也变得不够稳定。下面以前三种相对较为稳定的情况进行分析。

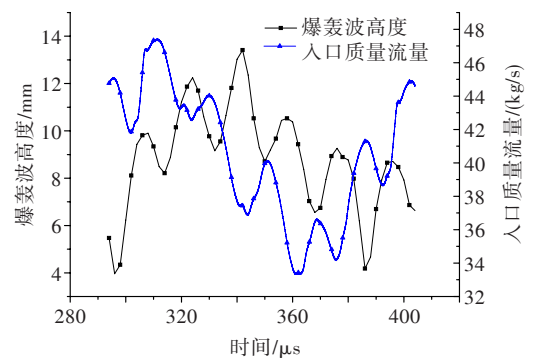
表 3 给出了计算边界条件相同时几种坡度下燃烧室内性能参数的变化。可见,当燃烧室内所采用的中间壁面高度不大于 15 mm 时,随着燃烧室入口端坡度的逐渐增加,爆轰波的传播速度及其最大峰值压力与坡度呈正比,而入口平均质量流量与坡度呈反比。随着燃烧室入口端坡度的增加,燃烧室出口平均总压也逐渐增加,从而造成其增压比逐渐增加。为探究其原因,对不同坡度下燃烧室入口截面处的压力进行计算。结果表明,三种情况下,燃烧室入口截面处的平均总压分别为 398 946 Pa、399 455 Pa、399 929 Pa。可见在一定范围内,随着燃烧室入口端坡度的提高,其入口截面处的平均总压逐渐增加,虽然这种变化并不显著,但是爆轰燃烧室具有增压特性,最终造成出口平均总压会有较大的增加和变化。当燃烧室中间壁面高度达到 20 mm 时,爆轰波在燃烧室的工作过程变得不够稳定,从而导致其传播速度及做功能力等都出现了大幅衰减;直到中间壁面高度达到 25 mm 时,燃烧室内不再形成进行稳定工作的爆轰波。所以,在一定范围内,适当增加燃烧室入口端坡度,有助于提高其做功能力。

3.3 双波头特性研究

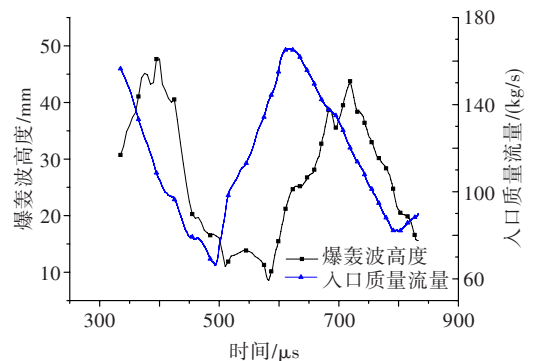
3.3.1 爆轰波波头高度分析

研究发现,爆轰波在燃烧室内传播过程中,其波

头高度呈现出一定的周期性变化。图 9 给出了不同周向长度无障碍爆轰燃烧室两个周期内爆轰波波头高度和入口质量流量随时间的变化。可见,周向长度为 100 mm 时,爆轰波在传播过程中,其波头高度的最大值为 13.41 mm,最小值为 3.96 mm,即使在一个周期内波头高度也出现了很多波动。根据前人总结的经验,当旋转爆轰燃烧室周向长度较大时,爆轰波前方会充入更多的可燃预混气,从而提高其做功能力。但燃烧室直径的增大,会使得爆轰波在燃烧室内的传播变得极为不稳定,最主要的表现就是爆



(a) 100 mm



(b) 300 mm

图 9 不同周向长度无障碍爆轰燃烧室内爆轰波波头高度和入口质量流量随时间的变化

Fig.9 The variation of detonation wave height and mass rate at entrance with time in detonation combustor with different circumferential length

表 3 不同坡度下燃烧室内性能参数的变化

Table 3 The performance characteristics of combustor with different slope entrance

中间壁面高度/mm	周期/ μ s	爆轰波传播速度/(m/s)	最大压力峰值/MPa	平均入口质量流量/(kg/s)	出口平均总压/MPa	增压比
0	152.48	1 967	6.51	122.01	1.05	2.63
10	152.34	1 969	6.85	118.66	1.08	2.70
15	151.52	1 979	7.96	111.80	1.15	2.88
20	157.80	1 901	8.73	108.72	0.94	2.32
25	—	—	—	—	—	—

轰波波头高度的变化。

周向长度为 300 mm 时, 爆轰波在传播过程中, 波头高度呈现出较为明显的周期性变化, 其最大值为 47.66 mm, 最小值为 8.62 mm, 其变化范围之大显现出爆轰波在燃烧室内传播过程中的较大波动性。与周向长度为 100 mm 时相比, 爆轰波波头高度的变化频率有所降低, 其最大值和最小值都有所增加, 但最大值增加的幅度明显比最小值增加的幅度大。从图 9 中可以看出, 燃烧室入口处的质量流量与爆轰波波头高度呈现出相同的变化趋势, 但入口质量流量的变化明显比爆轰波波头高度的变化提前。这主要是因为之前的入口质量流量变化, 导致了燃烧室内新鲜预混气的三角形进气区域变化, 在维持爆轰波稳定传播的情况下, 也使后传来的爆轰波波头高度发生了变化。

3.3.2 双波头燃烧室流场分析

针对燃烧室内爆轰波出现的不稳定现象, 在燃烧室内采用双波头起爆的方式进行研究。当在典型无障碍旋转燃烧室内同时起爆两股爆轰波后, 爆轰波传播稳定时, 燃烧室内一个周期内的温度云图如图 10 所示。从图中可以看出, 燃烧室内所获得的两股爆轰波的结构基本相同, 爆轰波及其后方斜激波处的温度达到 3 200 K 左右, 不同时刻两股爆轰波之间的距离基本保持不变, 说明两股爆轰波的传播速度基本相同。此时燃烧室内可非常清晰地看到两个规整的三角形进气区域, 从而有效保证了爆轰波在燃烧室内的稳定传播。与之前在燃烧室内进行的单波头的情况相比, 显然在爆轰波的传播过程中, 爆轰波高度并未出现较大波动。所以当通过增加旋转爆轰燃烧室周向尺寸来提高其增压比时, 可以考虑在爆轰燃烧室内同时起爆双波头甚至多波头来维持其稳定。

为充分研究燃烧室内爆轰波波头数目对其性能的影响, 分别在无障碍爆轰燃烧室内和楔形爆轰燃烧室内进行计算研究。图 11 为在无障碍旋转爆轰燃烧室内分别起爆一股爆轰波和两股爆轰波时, 燃烧室内入口质量流量和出口平均总压随时间的变化。从图 11(a) 可看出, 爆轰波在燃烧室内稳定传播时, 其入口处的平均质量流量也呈现出周期性变化; 相对于起爆一股爆轰波, 起爆两股爆轰波时变化趋势在逐渐减弱, 每个周期内入口处最大质量流量和最小质量流量的差值也在逐渐减小。起爆一股爆轰波时, 燃烧室入口处的最大平均质量流量为 171.13

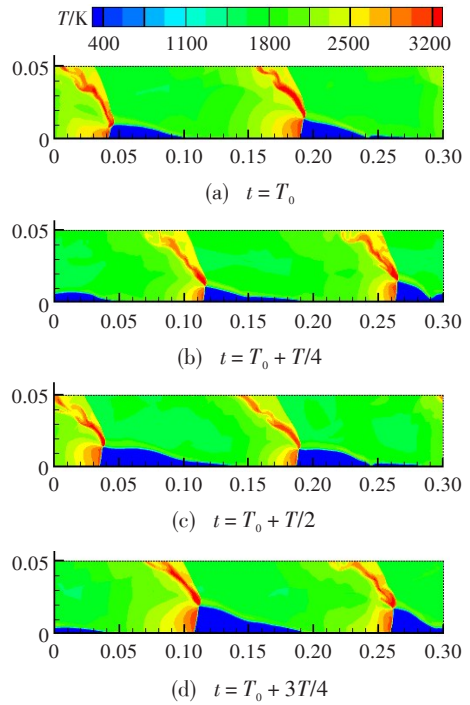
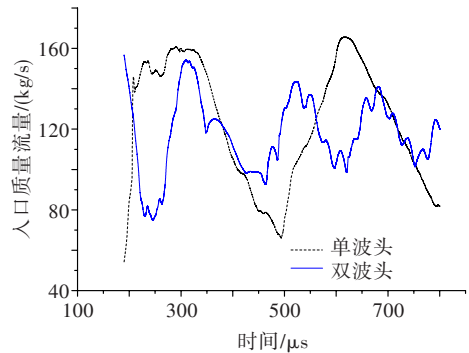
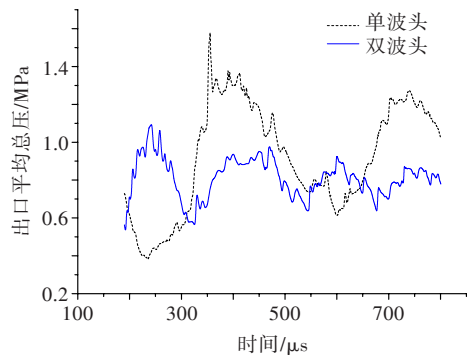


图 10 双波头起爆后流场稳定后的温度云图

Fig.10 Temperature contours



(a) 入口质量流量



(b) 出口平均总压

图 11 无障碍爆轰燃烧室内入口质量流量和出口平均总压随时间的变化

Fig.11 The variation of mass rate at entrance and mean total pressure at exit with time in detonation combustor

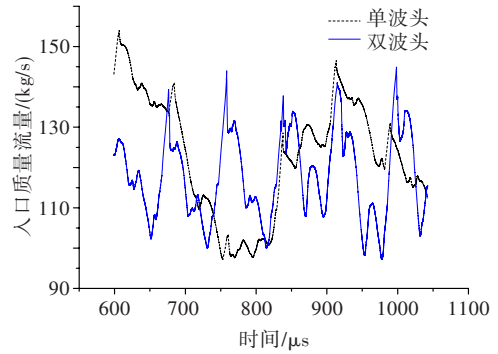
kg/s, 最小平均质量流量为 54.27 kg/s, 波动性很大; 同时起爆两股爆轰波时, 燃烧室入口处的最大平均质量流量为 156.73 kg/s, 最小平均质量流量为 74.87 kg/s, 其波动性有所减弱。

从图 11(b)可以看出, 分别起爆一股爆轰波和两股爆轰波时, 出口最大平均总压分别为 1.67 MPa 和 1.19 MPa, 最小平均总压分别为 0.50 MPa 和 0.54 MPa。起爆一股爆轰波时, 出口平均总压波动较大; 起爆两股爆轰波时, 出口平均总压也呈现出周期性变化, 但随着爆轰波的稳定传播, 其出口平均总压波动逐渐减小, 最终将近趋于平稳。所以燃烧室内爆轰波波头数目会影响爆轰波传播的稳定性。为提高燃烧室增压比而采用较大周向尺寸的燃烧室时, 可考虑在燃烧室内起爆双波头甚至多波头来维持爆轰波的稳定传播。

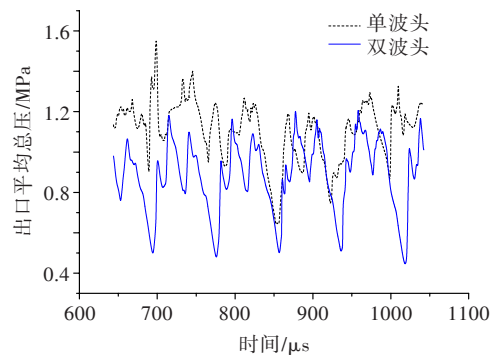
通过前文研究可知, 楔形燃烧室具有比典型无障碍旋转爆轰燃烧室更高的做功能力, 在楔形燃烧室内同时起爆一股爆轰波和两股爆轰波必将对其性能产生一定影响。下面通过在楔形燃烧室内壁面处分别起爆一股和两股爆轰波, 来分析波头数目对楔形旋转爆轰燃烧室性能的影响。

图 12(a)为不同波头数目下燃烧室内入口质量流量随时间的变化。可见, 在燃烧室内分别起爆一股和两股爆轰波时, 燃烧室入口处的最大质量流量分别为 155.96 kg/s 和 144.88 kg/s, 最小质量流量分别为 97.17 kg/s 和 97.15 kg/s。起爆一股爆轰波时, 燃烧室入口质量流量呈现出一定的周期性变化, 且波动性很大。起爆两股爆轰波时, 入口质量流量变化规律较为稳定。

图 12(b)为不同波头数目下燃烧室出口平均总压随时间的变化。可见, 燃烧室出口平均总压随时间也呈现出一定的周期性变化。起爆一股爆轰波时, 燃烧室出口的最大平均总压为 1.55 MPa, 最小平均总压为 0.64 MPa; 起爆两股爆轰波时, 出口最大平均总压为 1.16 MPa, 最小平均总压为 0.45 MPa。显



(a) 入口质量流量



(b) 出口平均总压

图 12 楔形燃烧室内入口质量流量和出口平均总压随时间的变化

Fig.12 The variation of mass rate at entrance and mean total pressure at exit with time in wedge shape combustor

然, 起爆两股爆轰波时燃烧室出口平均总压更小, 波动范围也更小, 且其变化也较为稳定。所以, 当楔形旋转爆轰燃烧室尺寸较大时, 同时起爆两股爆轰波甚至多股爆轰波, 也有助于提高爆轰波传播过程的稳定性。

表 4 为分别在无障碍旋转爆轰燃烧室和楔形燃烧室内起爆一股和两股爆轰波后其性能参数的变化。可见, 无论是在何种结构的燃烧室内, 相比于起爆一股爆轰波, 起爆两股爆轰波时爆轰波的传播速度、最大峰值压力、入口平均总压及增压比都有所降低。主要是因为, 当在燃烧室内起爆两股爆轰波达

表 4 不同燃烧室内波头数目对其性能的影响

Table 4 The effect of detonation wave number on the performance in different combustors

		周期/ μs	爆轰波传播速度/(m/s)	最大压力峰值/MPa	平均入口质量流量/(kg/s)	出口平均总压/MPa	增压比
无障碍	单波头	152.48	1 967	6.51	122.01	1.05	2.63
爆轰燃烧室	双波头	156.54	1 916	6.00	119.96	0.89	2.23
楔形	单波头	152.34	1 969	6.85	118.66	1.08	2.70
爆轰燃烧室	双波头	158.94	1 888	5.47	117.40	0.91	2.28

到稳定工作状态时,燃烧室内形成的爆轰波高度会有所降低,而爆轰波后方的斜激波会变长,其强度也逐渐增加,爆轰燃烧后所产生的气流在经过斜激波时会有一定的熵增,从而造成一定的压力损失,而斜激波越长这种损失越明显,所以其出口总压也会有所降低,最终造成增压比也会有所降低。

4 结论

(1) 将爆轰燃烧室入口边界设置为楔形结构,有助于提高沿单一方向传播的爆轰波的强度;在一定范围内,楔形燃烧室内爆轰波的传播速度及燃烧室的增压比,都要比典型的无障碍爆轰燃烧室有所提高。在爆轰燃烧室入口边界处采用适当的楔形结构,有助于提高其做功能力。

(2) 在爆轰波的传播过程中,波头高度呈现周期性变化;随着燃烧室周向尺寸的增加,爆轰波波头高度的震荡范围减小;爆轰波波头高度变化与燃烧室入口质量流量变化趋势相同。

(3) 当为提高爆轰燃烧室的增压特性而采用周向尺寸较大的燃烧室时,可以考虑在燃烧室内同时起爆两股甚至多股爆轰波来维持其稳定工作。但起爆两股爆轰波时燃烧室内的压力损失会有所增加,从而使得爆轰燃烧室的增压要比起爆一股爆轰波时有所降低。

参考文献:

[1] 姜宗林. 爆轰推进概念与机理研究——新型发动机研究的热点[J]. 科技前沿与学术评论, 2010, 23(4): 25—31.

[2] Voitsekhovskii B V, Mitrofanov V V, Topchiyan M E. Structure of the detonation front in gases[J]. Fizika Goreniya i Vzryva, 1969, 5(3): 385—395.

[3] Thomas L M, Schauer F R, Hoke J L. Buildup and operation of a rotating detonation engine[R]. AIAA 2011-602, 2011.

[4] Wolanski P. Detonation engines[J]. Journal of KONES Powertrain and Transport, 2011, 18(3): 515—521.

[5] Wolanski P, Kindracki J, Fujiwara T, et al. An experimental study of rotating detonation engine[C]// 20th International Colloquium on the Dynamics of Explosions and Re-

active Systems. 2005.

[6] Kindracki J, Wolanski P, Gut Z. Experimental research on the rotating detonation in gaseous fuels-oxygen mixtures [J]. Shock Waves, 2011, 21(2): 75—84.

[7] Kindracki J, Kobiera A, Rarata G, et al. Influence of ignition position and obstacles on explosion development in methane-air mixture in closed vessels[J]. Loss Prevention in the Process Industries, 2007, 20: 551—561.

[8] Swiderski K, Folusiak M, Kindracki J, et al. Experiment and numerical study of the rotating detonation engine in hydrogen-air mixtures[J]. Progress in Propulsion Physics, 2011, 2: 555—582.

[9] Yi T H, Lou J, Turangan C, et al. Effect of nozzle shapes on the performance of continuously rotating detonation engine[R]. AIAA 2010-152, 2010.

[10] 姜孝海, 范宝春, 董刚, 等. 旋转爆轰流场的数值模拟[J]. 推进技术, 2007, 28(4): 403—407.

[11] 张旭东, 范宝春, 归明月, 等. 旋转爆轰的三维结构和侧向稀疏波的影响[J]. 爆炸与冲击, 2010, 30(4): 337—341.

[12] 张旭东, 范宝春, 潘振华, 等. 旋转爆轰胞格结构的实验和数值研究[J]. 爆炸与冲击, 2011, 31(4): 337—342.

[13] 张旭东, 范宝春, 潘振华, 等. 旋转爆轰自持机理的数值研究[J]. 弹道学报, 2011, 23(1): 1—8.

[14] 张旭东, 范宝春, 归明月, 等. 用于推进的爆轰波的精细结构[C]// 第二届爆轰与爆震发动机研讨会摘要集. 2011.

[15] 张旭东. 旋转爆轰流场结构及自持传播机理的数值研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2011.

[16] 周蕊, 王健平. 连续爆轰发动机热力学性质的数值模拟[J]. 航空动力学报, 2011, 27(1): 16—24.

[17] Zhou Rui, Wang Jian-ping. Numerical investigation of flow particle paths and thermodynamic performance of continuously rotating detonation engines[J]. Combustion and Flame, 2012, 159(12): 3632—3645.

[18] 邵业涛, 王健平, 藤原俊隆. 连续爆轰发动机的二维数值模拟研究[C]// 第十三届全国激波与激波管学术会议. 2008: 259—264.

[19] 邵业涛, 刘勤, 王健平. 圆柱坐标系下连续旋转爆轰发动机的数值模拟[J]. 推进技术, 2009, 30(6): 717—721.

[20] Shao Ye-tao, Wang Jian-ping. Change in continuous detonation wave propagation mode from rotating detonation to standing detonation[J]. Chinese Physics Letters, 2010, 27(3): 1—4.