

重整气爆轰增压燃烧特性分析

吴森¹, 刘倩², 郑洪涛²

(1. 中国人民解放军海军驻沈阳地区发动机专业军事代表室, 沈阳 110006;

2. 哈尔滨工程大学动力与能源工程学院, 哈尔滨 150001)

摘 要: 为了提高燃气轮机的热效率, 提出将化学回热技术(CR)与连续旋转爆轰增压燃烧(CRDPC)技术进行有效结合的思路。通过实验研究与数值研究的方法分别考察了不同的甲烷蒸汽重整方案对热回收的影响、重整气的增压燃烧流场特性及燃烧室性能等。结果表明: 并列协同催化甲烷蒸汽重整方案具有最佳的重整性能, 甲烷转化率和总焓增加率分别达到 46.51% 和 25.28%; 重整气组分的差异对爆轰波系流场结构影响较小, 但是氢气质量分数的增加可以提高爆轰波传播速度, 也会加剧新鲜预混气与上一轮爆轰产物的接触间断处的提前燃烧; 在总压相同且重整气与空气以化学当量比进行预混的前提下, 重整气中氢气质量分数增加 1.1% 左右时, 预混气入口比质量流量降低约 4.5%, 但连续旋转爆轰燃烧室增压比降低约 6.0%, 这主要是接触间断处的提前燃烧造成的。

关 键 词: 连续旋转爆轰增压燃烧室; 蒸汽重整; 重整气; 增压比; 燃烧室性能

中图分类号: V231; O381

文献标志码: A

Analysis on detonation pressurized combustion characteristic of reformed gas

WU Sen¹, LIU Qian², ZHENG Hong-tao²

(1. Naval Consumer Representative Office of Engine in Shenyang,
the Chinese People's Liberation Army, Shenyang 110006, China;

2. College of Power and Energy Engineering,
Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: In order to improve the thermal efficiency of gas turbine, an idea of effective combination of chemically recuperation (CR) with continuously rotating detonation pressurized combustion (CRDPC) was put forward. The effects of different forms of methane steam reforming on the heat recovery, the characteristics of pressurized combustion flow field and combustion performance of reformed gas were separately investigated through experimental and numerical researches. Results show that synergistic catalytic reforming has the best performance, with methane conversion rate of 46.51% and total enthalpy increase rate of 25.28%; the difference of reformed gas components has little effect on the detonation wave flow structure, but the increase of H₂ mass fraction can improve the detonation wave propagation speed, and will intensify the precombustion in the contact discontinuity between fresh mixed gas and detonation products from the previous wave; under the premise of the same total pressure and stoichiometric ratio, when H₂ mass fraction increases by about 1.1%, the

收稿日期: 2014-10-02

作者简介: 吴森(1982—), 男, 江苏兴化人, 工程师, 博士, 主要从事燃气轮机监造研究。

通讯作者: 郑洪涛(1962—), 男, 辽宁本海人, 教授、博士生导师, 博士, 主要从事低排放与强化燃烧技术的研究。

E-mail: zhenghongtao9000@163.com

inlet mass flow rate of premixed gas decreases by about 4.5%, but the pressurized ratio of CRDPC decreases by about 6.0%, mainly due to the precombustion at the contact discontinuity.

Key words: continuously rotating detonation pressurized combustor;
steam reforming; reformed gas; pressurized ratio;
combustor performance

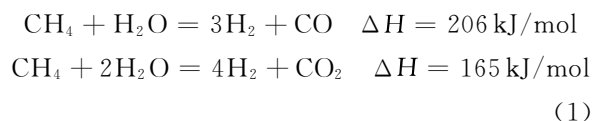
燃气轮机作为船舶的主要动力装置,为船舶提供推进动力和电力等.提高燃气轮机的热效率和降低污染物排放是能源动力领域的一个非常重要的研究方向.本文从能量综合利用的角度出发,基于化学回热循环概念,采用低温等离子体与催化剂协同催化的重整形式对燃料进行深度蒸汽重整,提高余热利用率,进而提高先进循环的热效率;从突破传统布雷顿循环等压燃烧热力过程产生压损的角度出发,基于爆轰燃烧具有增压特征的原理,对重整气燃料采用连续爆轰增压燃烧方法提高工质的做功能力,构建一个燃烧加热的热力过程,以进一步提高燃气轮机循环热效率.

连续旋转爆轰燃烧具有自持传播且不受来流速度的影响等特性,可以满足舰用燃气轮机的基本要求;由于近等容的燃烧模态,燃烧室出口总压大幅度提高,从而可以降低压气机耗功,在提升燃机效率等方面具有诱人的前景^[1].国内的国防科学技术大学^[2]、北京大学^[3]及南京理工大学^[4],美国德州大学阿灵顿分校(UTA)^[5]、波兰华沙工业大学(WUT)^[6]、俄罗斯拉夫连季耶夫流体力学院(LIH)^[7]等单位分别对连续旋转爆轰发动机开展了大量的实验研究.为了对爆轰流场内部结构有更清晰的认识,同时辅助实验研究的进行,国内外学者也开展了大量的数值研究^[8-9].

爆轰波是激波与化学反应的强耦合,爆轰波存在的一个决定性条件是化学反应能以足够快的速度进行,而反应速率的快慢与采用的燃料密切相关.关于连续爆轰的研究,目前通常采用活化能较低的氢气作为燃料^[10-11],氧化剂为空气或氧气;虽然有些学者也开始着手研究碳氢燃料/空气的爆轰情况,但是选择的燃料仍是具有较低活化能的乙烯、乙炔、丙烷等燃料^[12-13],而关于甲烷/空气的连续旋转爆轰的研究鲜见报道.由于甲烷具有较高的活化能,需要极高的直接起爆能量,并且不易起爆,因此目前关于甲烷/空气爆轰燃烧的研究主要集中在两方面:一是采用长圆管研究爆轰波的传播速度及胞格尺寸,爆轰管长度一般在 70 m

以上,直径大于 1 m^[14];另一多通过数值分析的方式研究甲烷气中添加氢气后的爆轰胞格尺寸的变化情况.结果表明在甲烷中添加一定量的氢气,爆轰胞格尺寸大大减小,这将有助于减小起爆所需能量^[15].

化学回热循环燃气轮机(CRGT)是一种非常具有前景的先进循环燃气轮机,通过采用强吸热的燃料蒸汽重整技术,深度利用燃气轮机排气余热,大大提高了燃机的热效率.根据重整反应方程式(1)可知,在重整反应过程中将产生大量氢气.这对于解决甲烷/空气连续旋转爆轰的起爆问题及减小爆轰燃烧室的尺寸等方面具有重要的意义,式(1)中 ΔH 表示重整反应的焓变.



将化学回热技术与连续旋转爆轰增压燃烧技术进行有效结合,首先利用涡轮排气余热进行甲烷蒸汽重整反应,产生富含氢气的重整气燃料;然后重整气/空气在连续旋转爆轰增压燃烧室中燃烧并快速释放热量,从而大大提高燃气轮机的热效率.开展了 4 种不同重整形式下甲烷蒸汽重整的研究,明确了可用于余热回收利用的最佳重整形式;研究了不同组分重整气在连续旋转爆轰燃烧室中的流场情况及其燃烧室性能,为重整气爆轰实验研究的开展提供支持.

1 理论基础及计算模型

1.1 爆轰流场的定常处理

爆轰波本质上是在可燃气体中以近高超声速自持传播的伴有放热化学反应的强激波.可燃介质经过前导激波压缩进入诱导反应阶段,生成各种活化基团,压力和温度增加;诱导反应过程后化学反应进入放热反应阶段,大量的化学能量得以释放,气流温度不断升高,直至达到 Chapman-Jouguet(C-J)声速面,化学反应完成.伴随着爆轰波的自持传播,整个流场处于非定常状态.

$$\begin{cases} \frac{v_1}{v_2} = \frac{\gamma_2 + 1}{\gamma_2} \\ D = \sqrt{2(\gamma_2^2 - 1)Q} \\ u_2 = \sqrt{\frac{2(\gamma_2 - 1)Q}{\gamma_2 + 1}} \\ p_2 = 2(\gamma_2 - 1)\rho_1 Q \\ T_2 = \frac{Q}{R_g} \cdot \frac{2\gamma_2(\gamma_2 - 1)}{\gamma_2 + 1} \end{cases} \quad (2)$$

当坐标系建立在爆轰波阵面上时,整个流场转化为定常流动,此时流线与迹线重合,即流线上各点处的流场特性对应于流体粒子进入到爆轰燃烧室后到达该点时的参数值.对于爆轰波来说, $p_2 \gg p_1$ ($p_2 > 10 p_1$ 即可),则 p_1 为零,并假定 u_1 为零,根据 C-J 理论的基本控制方程组,可得到近似式(2),其中下标 1,2 分别代表爆轰波阵面前、后参数.

1.2 计算模型及边界条件

图 1(a)为德州大学阿灵顿分校(UTA)开展的 CRDC 初始测试阶段的照片^[5].本文忽略径向效应的影响^[16],将三维计算域(见图 1(b))沿母线进行周向展开,得到二维计算域,具体尺寸如图 1(c)所示,图中 l 表示燃烧室周向长度, L 表示燃烧室轴向长度.左侧入口边界总温 T_0 为 300 K,总压为 0.5 MPa,燃料空气预混均匀且当量比为 1;入口采用收缩型喷嘴进行喷注,利用 Fluent 软件用户自定义函数(UDF)编程替代预混气喷注过程;右侧出口为压力出口;上下两边为周期性边界.

利用 Fluent 软件,忽略黏性、热传导和扩散等传输特性,求解二维非稳态欧拉控制方程组.物理通量采用矢量通量分裂法进行分解,对流项采用 3 阶 monotonic upstream-centered scheme for conservation laws(MUSCL)格式进行离散,时间项采用 2 阶隐式格式进行离散;化学反应模型为 4 步反应的有限速率模型,反应速率常数采用

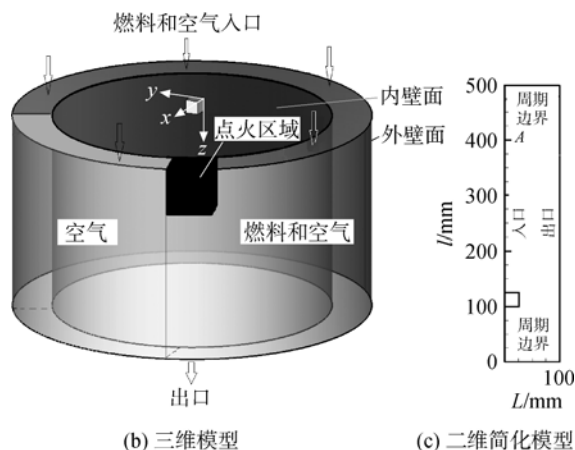
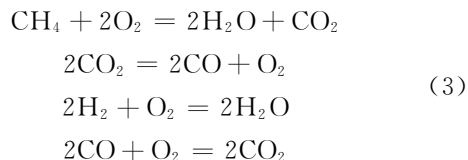


图 1 CRDC 示意图及计算区域

Fig. 1 Schematic diagram of CRDC and calculation region

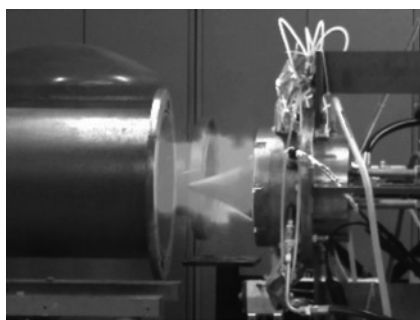
Arrhenius公式进行计算.



由于氢气的活性高,起爆能量低,容易实现连续旋转爆轰等优点,目前国内外学者多对氢气/空气的 CRDC 进行实验研究.为了验证数值计算模型的准确性,首先利用一步反应机理 $2\text{H}_2 + \text{O}_2 = 2\text{H}_2\text{O}$,采用 2 维计算域研究了氢气/空气的连续旋转爆轰特点,并与实验结果进行对比分析.

图 2 为爆轰流场的温度分布图,其中上方为 $1005 \mu\text{s}$ 时的数值模拟结果,下方为 Bykovskii 实验中观测到的旋转爆震波基本结构^[17].通过对比可以发现计算结果与实验测量结果所揭示的内部流场结构定性一致,其中 A 点为爆轰波, B 点为斜激波, C 点为滑移线, D 点为二次激波, E 点为新鲜预混气体与上一循环燃烧产物的接触间断面, F 点为阻塞段, G 点为新鲜混合物.

图 3 为爆轰燃烧室近入口壁面 A 点处压力随时间的变化曲线图,与实验中高频压力传感器(PCB)的测量结果具有相同的变化趋势.爆轰波



(a) 实验台

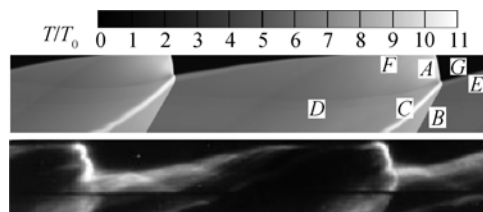
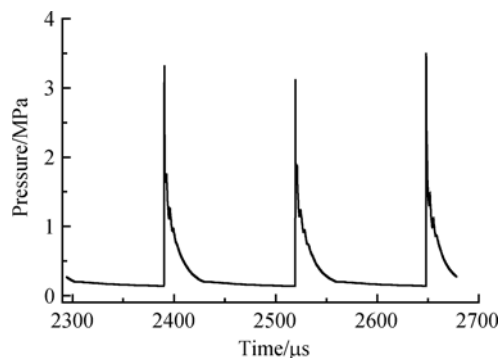


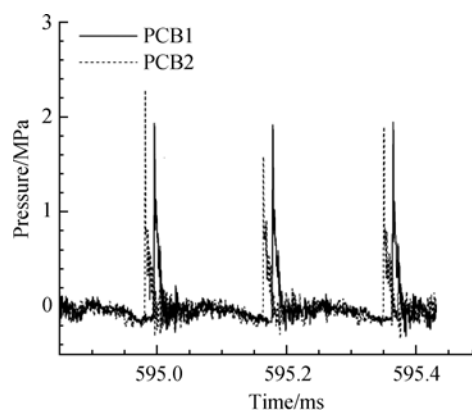
图 2 氢气/空气 CRDC 内温度分布对照

Fig. 2 Temperature solution comparison of H_2/air CRDC

阵面沿周向稳定传播,传播速度约为 1 939.9 m/s、平均压力峰值为 3.31 MPa。利用计算机辅助工程(CEA)软件计算得到理论 C-J 爆轰波参数分别为传播速度为 1 982.4 m/s、压力为 3.13 MPa,数值模拟结果与理论计算值的相对误差分别为 2.14% 及 5.82%。



(a) 数值模拟A点压力变化图



(b) 实验结果^[11]

图3 压力随时间变化的模拟与实验结果对比

Fig. 3 Comparison of simulational and experimental results of pressure varying with time

2 结果和分析

2.1 甲烷蒸汽重整分析

本文开展了甲烷蒸汽重整技术的实验研究,设计了不同类型的化学回热反应器,主要包括单独等离子体、单独催化剂、分段协同及并列协同反应器,分别命名为反应器 No. 1, No. 2, No. 3, No. 4, 并与无催化反应的换热器(No. 0)进行对比分析,实验装置及实验流程见图4,具体实验过程参考文献[18-19],其中轻烃(CH_4)通过气相色谱仪-火焰离子检测器(GC FID)进行分析, CO , CO_2 和 N_2 通过气相色谱仪-热导检测器(GC TCD B)进行分析, H_2 通过气相色谱仪-热导检测器(GC TCD C)进行分析。

实验操作条件为水蒸气/甲烷比为 2, 甲烷空速为 $680 \text{ mL}/(\text{g}_{\text{cat}} \cdot \text{h})$, 下标 cat 表示催化剂, 输入功率和频率分别为 70.13 W 和 41.93 kHz, 重整温度为 773 K, 重整压力为 0.12 MPa。产生的重整气组分主要包括 CO , CO_2 , H_2O , H_2 和未反应的 CH_4 。不同催化重整反应器下重整气组分的质量分数见表1。重整气中的有效燃烧组分为 CH_4 , H_2 和 CO 。

重整反应的主要性能指标包括甲烷转化率和总焓增加率,具体定义如下:

$$\chi = \frac{n_{\text{CH}_4, \text{inlet}} - n_{\text{CH}_4, \text{outlet}}}{n_{\text{CH}_4, \text{inlet}}} \quad (4)$$

$$\eta_{\text{total}} = \frac{\Delta Q_{\text{total}}}{Q_{\text{h}, \text{CH}_4}} = \frac{\Delta Q_{\text{sh}} + \Delta Q_{\text{h}, \text{v}}}{Q_{\text{h}, \text{CH}_4}} \quad (5)$$

其中 ΔQ_{sh} 和 $\Delta Q_{\text{h}, \text{v}}$ 分别代表显焓和热值的增加率,具体定义见式(6)和式(7)。

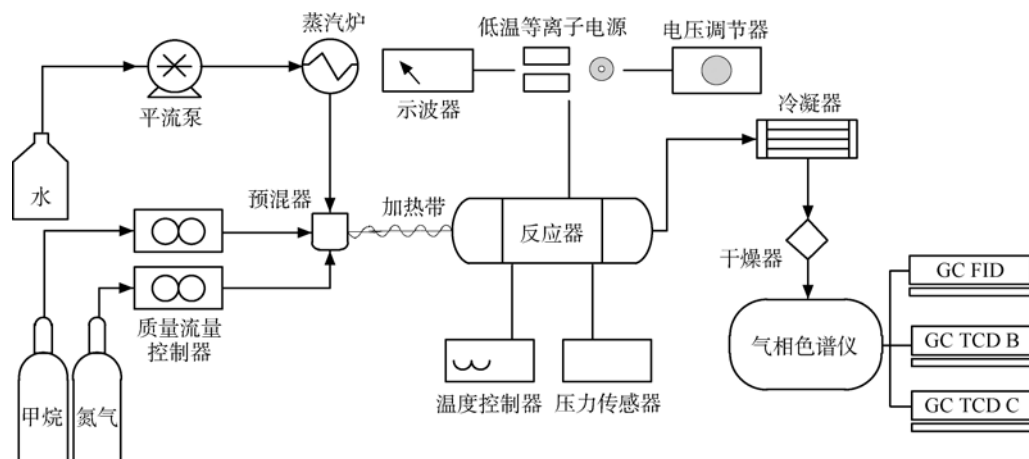


图4 实验装置流程图

Fig. 4 Flow chart of experimental setup

表 1 重整气组分的质量分数

Table 1 Mass fraction of compositions of reformed gas

重整气 组分	反应器编号			
	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4
CH ₄	0.2464	0.2959	0.2335	0.1648
CO ₂	0.1183	0	0.1434	0.2253
CO	0.0104	0.0025	0.0030	0.1041
H ₂	0.0276	0.0020	0.0334	0.0637
C ₂ H ₆	0	0.0065	0	0
H ₂ O	0.5973	0.6931	0.5868	0.4420

$$\Delta Q_{sh} = \sum \Delta H_j = \sum_j n_{out} x_j (H_{T,j} - H_{T=298K,j}) \quad (6)$$

$$\Delta Q_{lhv} = \sum_j n_{out} x_j Q_{lhv,j} - Q_{lhv,CH_4} \quad (7)$$

其中 $n_{CH_4, inlet}$ 和 $n_{CH_4, outlet}$ 分别为入口和出口甲烷摩尔流率, n_{out} 为 1 mol 甲烷重整后的总摩尔流率, $H_{T,j}$ 为出口温度 T 时各组分的显焓, x_j 为出口各组分的摩尔分数, 其中下标 j 代表组分 CH₄, CO₂, CO, H₂, C₂H₆ 和 H₂O.

图 5 为不同重整形式下的甲烷转化率和总焓增加率. No. 2 中的甲烷转化率最低, 仅为 3.97%; 而 No. 1 中, 由于反应温度较高, 甲烷转化率达到 20.14%; 而协同重整 No. 3 和 No. 4 中甲烷转化率分别达到 25.06% 和 46.51%. 随着甲烷转化率的提高, 重整气组分中甲烷质量分数逐渐减少, 相应的氢气质量分数逐渐增加. 总焓增加率具有与甲烷转化率相同的变化趋势. 反应器重整性能由强到弱依次为 No. 4 > No. 3 > No. 1 > No. 2.

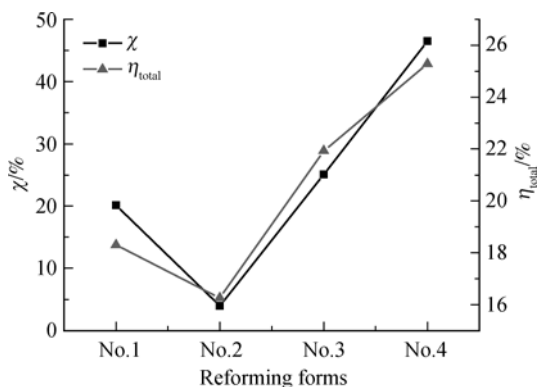


图 5 不同重整形式下的甲烷转化率和总焓增加率
Fig. 5 Methane conversion rate and total enthalpy increasing rate in different reformed forms

不同重整性能的差异主要与重整形式的催化机制相关. No. 1 主要通过 Ni 催化剂的吸附和解吸附作用降低反应物的活化能, 促进化学反应的进行; No. 2 主要利用介质阻挡放电产生高能电子, 碰撞反应物分子, 产生可以直接参与反应的自由基, 如 CH₃, CH₂, OH, H 等. 由于反应物流速较快, 反应物在放电区域的停留时间仅为 0.15 s, 在介质阻挡放电作用下产生自由基较少, 甲烷转化率较低.

No. 3 中等离子体为催化剂提供中间产物, 如 C₂H₂, C₂H₄ 和 C₂H₆ 等, 而 C₂ 的化合物可以在比甲烷转化所需温度更低的情况下在催化剂表面转换以加速催化反应的进行. 但根据表 1 可知, 在等离子催化作用下生成的 C₂ 质量分数相对较低, 因此分段协同效应不明显; No. 4 中可以充分利用等离子体产生的振动激发物质和自由基来有效增强催化反应的吸附和解吸附过程, 其中自由基一般会表现出较高的附着系数, 而振动活化甲烷可在低温下解离生成 CH₃ + H 等. 并列协同重整形式将催化剂催化和等离子体催化进行有效结合, 使 No. 4 中甲烷转化率约为 No. 1 和 No. 2 中甲烷转化率之和的两倍.

2.2 重整气/空气爆轰流场特性分析

本文主要研究总温为 300 K 时的爆轰情况, 此时重整气中水蒸气凝结, 进入爆轰燃烧室的重整气不包含水蒸气. 假定重整气与空气以化学当量比进行预混, 且混合均匀, 不同催化重整反应下预混气组分的质量分数见表 2. 由于 CO₂ 不参与化学反应, 因此作为惰性气体添加到重整气中.

表 2 预混气组分质量分数

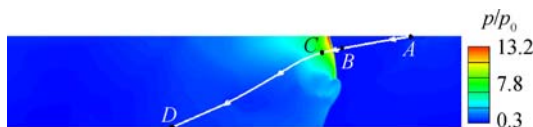
Table 2 Mass fraction of composition of premixed gas

预混气 组分	反应器编号				
	No. 0	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4
CH ₄	0.0551	0.0440	0.0532	0.0419	0.0283
CO ₂	0	0.0211	0	0.0257	0.0386
CO	0	0.0019	0.0005	0.0005	0.0179
H ₂	0	0.0049	0.0004	0.0060	0.0109
C ₂ H ₆	0	0	0.0012	0	0
O ₂	0.2203	0.2163	0.2202	0.2158	0.2108
N ₂	0.7246	0.7118	0.7246	0.7100	0.6935

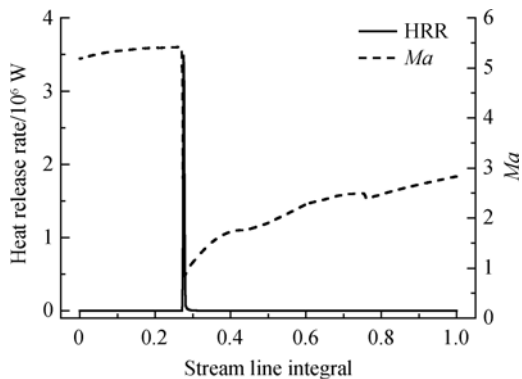
图 6(a) 为流线标示说明图, 图 6(b) 和图 6(c) 为相对坐标系下 (坐标系建立在爆轰波阵面上)

热释率(heat release rate, HRR), Ma 、无量纲压力和温度沿流线 AD 分布图, 其中横坐标为沿流线 AD 积分的无量纲化长度. 流体以超声速来流经过爆轰波后转变为亚声速, 亚声速气体经燃料燃烧释放的热量加热后, Ma 逐渐接近 1; 在定截面管流中, 流体 Ma 达到 1 后继续加热会出现热壅塞; 但是由于在爆轰波下游流域空间逐渐扩大, 声速流在扩张型区域中 Ma 进一步增加, 达到超声速流, 超声速来流遇到截面积变大, 便会产生膨胀波, 使波后流体速度增加, 压力温度密度均降低, 最后流出燃烧室.

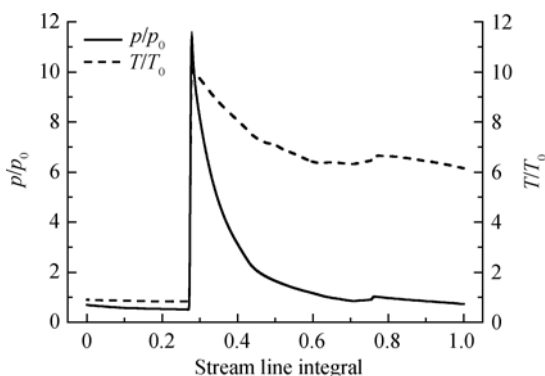
图 6(d) 和图 6(e) 为相对坐标系下的热释率(HRR), Ma 、无量纲压力 p/p_0 (爆轰波压力与来流气体压力之比) 和温度沿局部流线 BC 分布图. 结果表明不同重整形式下重整气的爆轰特性沿流线分布基本相同, 只在局部及拐点处略有差异. 这说明燃料组分的差异并不会改变爆轰流场结构, 不同组分下的重整气/空气爆轰流场结构基本相同.



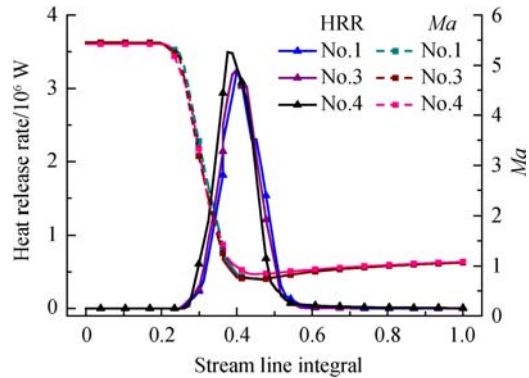
(a) 流线标示说明图



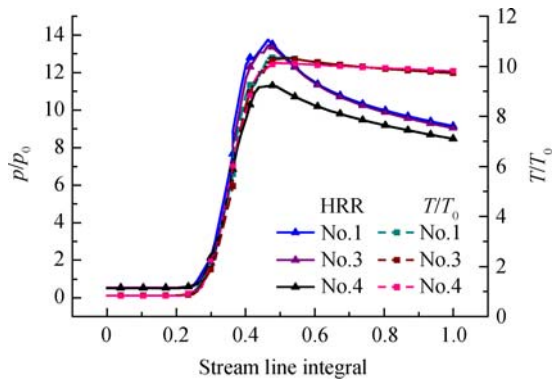
(b) HRR和 Ma 沿流线AD的分布图



(c) 无量纲压力和温度沿流线AD的分布图



(d) HRR和 Ma 沿局部流线BC的分布图



(e) 无量纲压力和温度沿局部流线BC的分布图

图 6 HRR, Ma 、无量纲压力和温度沿流线分布

Fig. 6 Distribution of HRR, Ma , non-dimension pressure and temperature along streamline

基于 C-J 爆轰波理论, 利用 CEA 程序, 对不同组分下的重整气燃料爆轰宏观特性进行了分析, 主要包括爆轰波传播速度 D 、爆轰波强度(利用无量纲压力 p/p_0 来衡量)等; 同时将二维数值计算结果也绘制到图 7 上. 二维数值模拟结果与 C-J 理论计算结果具有相同的变化趋势. 但是由于二维计算中包含了流场结构的影响, 如新鲜预混气在接触间断面处的局部爆燃燃烧、上一轮爆轰产物流入新鲜预混气对燃料造成的稀释作用等, 数值计算的爆轰特性略低于 C-J 理论计算值.

图 7(a) 表明爆轰波传播速度 D 的关系为: $No. 4 > No. 3 > No. 1 > No. 2 > No. 0$, 即氢气质量分数越高, 爆轰波传播速度越快. 由于入口总温总压相同, 因此重整气组分的差异是造成爆轰特性差异的主要原因. 不同重整气下爆轰波前后气体性质见表 3. 根据 C-J 理论的近似关系式可知, 爆轰波传播速度主要与波后绝热指数呈正比, 与放热量呈二次方根关系. 在甲烷蒸汽重整反应中甲烷转化率越高, 重整深度越大时, 重整气组分中氢气质量分数越高, 单位质量的预混气的放热量越高, 即放热量满足关系: $No. 4 > No. 3 > No. 1 >$

No. 2>No. 0. 由于入口为预混气为化学当量比, 氮气质量分数为氧气质量分数的 3.76 倍, 结合化学反应式(3)可知, 预混气组分中氮气质量分数呈现刚好相反的顺序, 即 No. 0>No. 2>No. 1>No. 3>No. 4, 而高的氮气质量分数决定了爆轰产物的相对较高的绝热指数. 虽然绝热指数略有变化, 但是其相对变化量仅为 0.45%, 而放热量的相对变化量为 5% 左右. 因此, 放热量仍起主导作用.

图 7(b) 表明爆轰波强度的关系为: No. 0>

No. 2>No. 1>No. 3>No. 4, 即氢气质量分数越高, 爆轰波强度越弱. 这主要是由于爆轰波后压力除了与波后绝热系数及放热量相关外, 也与来流密度呈正比关系, 而密度的相对变化量为 10.77% 左右. 利用 C-J 理论进行分析可知, 当氢气质量分数增加时, 来流密度减小, 从而使来流气体的当地声速增加, 虽然此时爆轰波传播速度也有所增加, 但是计算来流 Ma 仍减小. 因此, 经过爆轰波后的压力与来流压力之比不断减小. 综合分析可知, 来流密度对爆轰波强度的影响起主导作用.

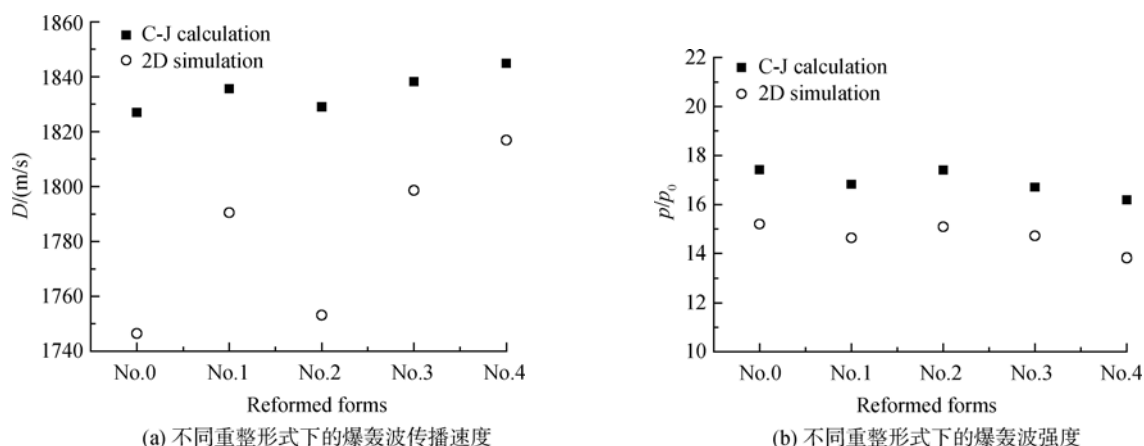


图 7 不同重整形式下的爆轰波传播速度及强度

Fig. 7 Detonation wave velocity and strength in different reformed forms

表 3 不同重整形式下爆轰波前后气体特性参数

Table 3 Gas characteristic parameters in the front and back of detonation wave at different reformed forms

气体特性参数	反应器编号				
	No. 0	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4
气体常数 $R_g/(J/(kg \cdot K))$	301.02	315.40	301.97	318.60	333.44
来流气体密度 $\rho/(kg/m^3)$	5.54	5.28	5.52	5.23	5.00
爆轰波前气体比热比 γ_1	1.3869	1.3881	1.3869	1.3883	1.3902
爆轰波后气体比热比 γ_2	1.2451	1.2424	1.245	1.2419	1.2394
放热量 $Q_c/(kJ/kg)$	2758.1	2813.4	2765.8	2824.8	2914.5

2.3 重整气/空气爆轰增压燃烧室性能分析

根据图 8 可知各自的最大反应速率基本与其质量分数呈正比关系. 对于并列协同重整形式, 氢气质量分数 w_{H_2} 为 0.0109, 甲烷质量分数 w_{CH_4} 为 0.0283, 相应的最大反应速率 R_{CH_4} , R_{H_2} 分别为 3.2×10^4 及 1.2×10^4 $kmol/(m^3 \cdot s)$. 最大反应速率发生在爆轰波前沿上, 但是在接触间断面处, 上一轮爆轰产物的温度较高, 约为 1500~1700 K, 新鲜预混气在接触间断面处发生局部爆燃燃烧, 反

应速率量级为 0.1~100 $kmol/(m^3 \cdot s)$.

图 9 为不同预混气下 OH 质量分数 w_{OH} 分布云图, 利用光源照射使图片类似数字纹影图. 除了爆轰波阵面附近, 在新鲜预混气与上一轮爆轰产物之间的接触间断面处也存在较明显的 OH 分布. 当预混气中氢气质量分数越高时, 接触间断面处过渡段宽度越大, 说明此处较多的燃料发生反应放出热量. 由于甲烷的活化能较高, 在这个温度下反应速率较低, 反应速率量级约为 0.1~1 $kmol/(m^3 \cdot s)$, 因此过渡段的热量大部分来自氢

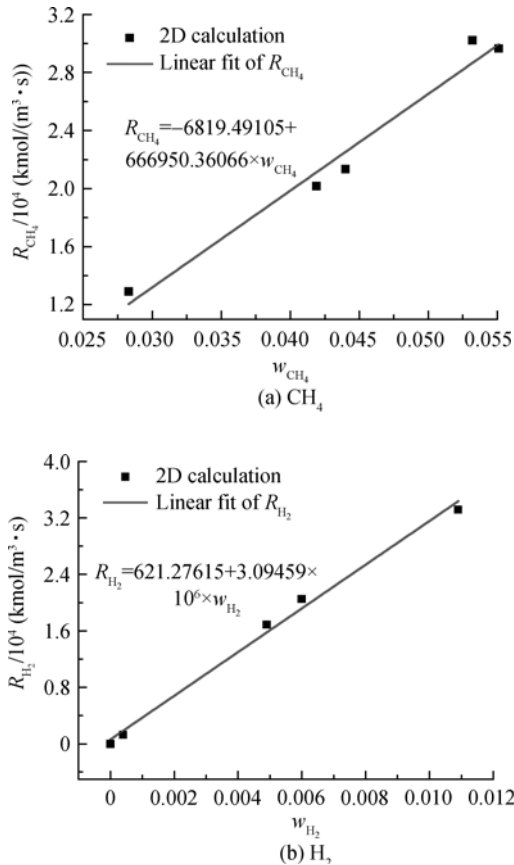


图 8 各组分最大化学反应速率与组分质量分数的关系

Fig. 8 Relationship of composition maximum reaction rate with composition mass fraction

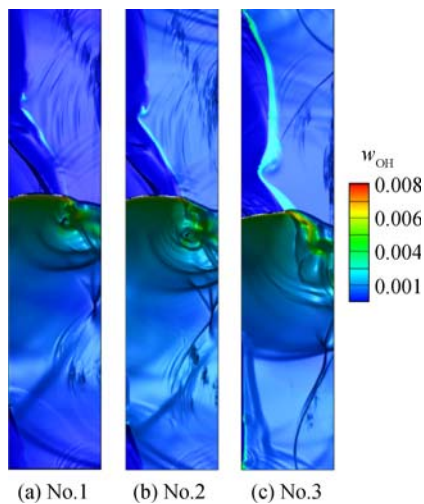


图 9 不同重整形式下的 OH 质量分数分布云图

Fig. 9 OH mass fraction contour in different reformed forms

气的燃烧放热. 因此, 氢气质量分数越高, 越容易发生局部爆燃燃烧, 导致预混气中燃料量减小, 并且在一定程度上稀释了预混气, 使其当量比略小于 1; 而且燃料以爆燃的模式而不是以理想中的

爆轰模态进行燃烧, 这在一定程度上将减弱增压的性能, 不利于热效率的提高.

根据爆轰波阵面及接触间断处的反应速率量级可以得出, 接触间断的反应速率约为爆轰波阵面上反应速率的 1% 或更低, 接触间断上存在一部分预混气的提前燃烧, 但是由于其反应速率相对较低, 因此, 大部分燃料仍以爆轰模态进行燃烧, 爆轰波可以持续稳定传播.

图 10 在爆轰波传播一周的无量纲旋转周期内, 预混气入口比质量流量 g 及增压比 π 均呈现周期性振荡变化, 且在一个旋转周期内存在 3 次规律性的振荡, 其振幅及振荡周期基本保持不变. 这与爆轰波与斜激波接触处产生的局部爆炸相关. 由于 No. 4 重整形式下爆轰波传播速度最高, 其传播频率也最大, 为 3.63 kHz.

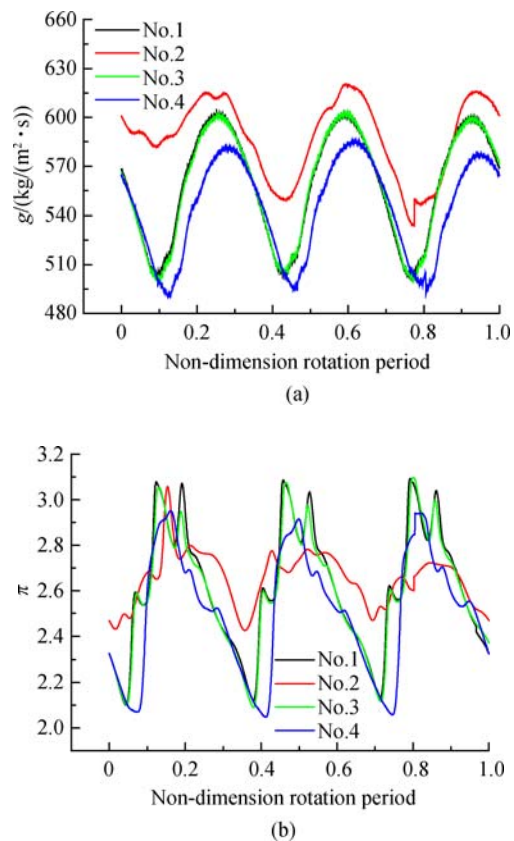


图 10 同重整形式下无量纲周期内参数的变化曲线

Fig. 10 Variation curves of parameters with non-dimension period in different reformed forms

当喷注压力相同时, 由于入口为收缩型喷嘴喷注, 最大喷注速度为声速, 则不同预混气的喷注速度基本相同. 而当组分中氢气质量分数越高时, 来流预混气的密度越小, 因此喷注到燃烧室的平均比质量流量越小. 根据表 4 可知, 在纯甲烷爆轰

表 4 重整气组分对 CRDC 性能的影响

Table 4 Effect of composition of reformed gas on CRDC performance

参数	反应器编号				
	No. 0	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4
爆轰波最大峰值压力 $p_{\text{peak}}/\text{MPa}$	7.598	7.315	7.541	7.354	6.914
爆轰波周向传播速度 $U_d/(\text{m/s})$	1946.4	1790.5	1953.2	1798.6	1816.9
爆轰波传播频率 f_d/kHz	3.49	3.58	3.51	3.60	3.63
比质量流量 $g/(\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}))$	569.96	557.60	576.76	555.56	544.09
增压比 π	2.677	2.615	2.633	2.603	2.517

燃烧中,比质量流量为 $569.96 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$;在并列协同重整形式下,比质量流量减小为 $544.09 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,即当重整气中 H_2 质量分数增加 1.1% 时,预混气入口比质量流量降低约 4.5%。

加热过程是熵增过程,凡是熵增都会造成总压损失,带来热阻;但爆轰增压燃烧室出口总压是增加的.这是由于爆轰燃烧的影响使爆轰波阵面处总压相对于来流新鲜预混气总压有一个巨大的提升.爆轰燃烧过程主要分为两个步骤:①引导激波压缩,使波后气体压力温度急剧增加;②化学反应速率为 10^4 量级,单位为 $\text{kmol}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$,燃料在极短的时间和距离内完全燃烧放出热量.从总体上看上述过程接近定容燃烧,爆轰燃烧完成之后,爆轰产物压力温度都达到较高的水平.

不同重整形式下爆轰增压燃烧室中增压比呈如下关系: $\text{No. } 0 > \text{No. } 2 > \text{No. } 1 > \text{No. } 3 > \text{No. } 4$,与重整深度刚好相反,即氢气质量分数越高时,爆轰增压燃烧室的增压比越小,当重整气中氢气质量分数增加 1.1% 时,但连续旋转爆轰燃烧室增压比降低约 6.0%. 这一方面是由于本次研究的前提是总压相同,根据上文分析可知,氢气质量分数越高时,来流总质量流量越小,因此总的放热量减小;另一方面,氢气质量分数较高时,接触间断处的局部爆燃燃烧使一部分燃料消耗掉,因这部分燃料是以等压的方式进行燃烧,对于提高增压比不起作用.

3 结 论

1) 单独催化剂、单独等离子体、分段协同及其并列协同重整形式下的甲烷转化率分别为 20.14%, 3.97%, 25.06% 和 46.51%;总焓增加率分别为 18.3%, 16.26%, 21.93% 和 25.28%. 并列式协同重整有效结合了催化剂的选择性及其等离子体的非平衡特性,在化学回热方面具有最

佳的性能;

2) 在重整气/空气的爆轰增压燃烧室中,燃料组分的差异对爆轰流场结构影响较小,不同组分下的爆轰流场结构基本相同;

3) 当预混气中氢气质量分数增加时,爆轰波传播速度加快,但是爆轰波强度减弱;接触间断处更容易发生爆燃燃烧,导致部分燃料以定压燃烧方式消耗掉,这不利于爆轰增压燃烧室中增压比的提高,但是较快的传播速度又可以使不利影响的程度降低;

4) 在相同的入口总压,且重整气与空气以化学当量比进行均匀混合时,重整气中氢气质量分数越高,爆轰增压燃烧室的入口比质量流量越小,增压比也相应减小.纯甲烷/空气爆轰增压燃烧室中增压比最高达到 2.677. 氢气的添加在燃烧室的增压比等性能方面没有优势.

参考文献:

- [1] Wolański P. Detonative propulsion [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2013, 34(1): 125-158.
- [2] LIU Shijie, LIN Zhiyong, LIU Weidong, et al. Experimental and three-dimensional numerical investigations on H_2 /air continuous rotating detonation wave [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G Journal of Aerospace Engineering, 2013, 227(2): 326-341.
- [3] 李永生,王健平,石天一,等.连续爆轰发动机燃烧室内压力分布的实验研究 [J]. 国际航空航天科学, 2013, 1(2): 7-12.
LI Yongsheng, WANG Jianping, SHI Tianyi, et al. Experimental research on the pressure distribution of continuous detonation engines [J]. Journal of Aerospace Science and Technology, 2013, 1(2): 7-12. (in Chinese)
- [4] 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.
ZHANG Xudong, FAN Baochun, PAN Zhenhua, et al. Experimental and numerical investigation on cellular patterns of rotating detonations [J]. Explosion and Shock Waves, 2011, 31(4): 337-342. (in Chinese)

- [5] Braun E M, Dunn N L, Lu F K. Testing of a continuous detonation wave engine with swirled injection[R]. AIAA-2010-146, 2010.
- [6] Kindracki J, Wolański P, Gut Z. Experimental research on the rotating detonation in gaseous fuels: oxygen mixtures [J]. Shock Waves, 2011, 21(2): 75-84.
- [7] Bykovskii F A, Zhdan S A, Vedernikov E F. Continuous spin detonation of a hydrogen: air mixture with addition of air into the products and the mixing region[J]. Combustion, Explosion and Shock Waves, 2010, 46(1): 52-59.
- [8] 马虎, 封锋, 武晓松, 等. 压力条件对旋转爆震发动机的影响[J]. 弹道学报, 2012, 24(4): 94-98.
MA Hu, FENG Feng, WU Xiaosong, et al. Effect of pressure condition on rotating detonation engine[J]. Journal of Ballistics, 2012, 24(4): 94-98. (in Chinese)
- [9] Frolov S M, Dubrovskii A V, Ivanov V S. Three-dimensional numerical simulation of operation process in rotating detonation engine [J]. Progress in Propulsion Physics, 2013, 4: 467-488.
- [10] Braun E M, Lu F K, Wilson D R, et al. Airbreathing rotating detonation wave engine cycle analysis [J]. Aerospace Science and Technology, 2013, 27(1): 201-208.
- [11] LIU Shijie, LIN Zhiyong, LIU Weidong, et al. Experimental realization of H_2 air continuous rotating detonation in a cylindrical combustor [J]. Combustion Science and Technology, 2012, 184(9): 1302-1317.
- [12] Bykovskii F A, Vedernikov E F. Heat fluxes to combustor walls during continuous spin detonation of fuel-air mixtures[J]. Combustion, Explosion and Shock Waves, 2009, 45(1): 70-77.
- [13] Schwer D, Kailasanath K. Fluid dynamics of rotating detonation engines with hydrogen and hydrocarbon fuels[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2013, 34(2): 1991-1998.
- [14] Zipf R K, Jr, Gamezo V N, Sapko M J, et al. Methane-air detonation experiments at NIOSH Lake Lynn Laboratory [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2013, 26(2): 295-301.
- [15] Porowski R, Teodorczyk A. Cellular structure of detonation wave in hydrogen-methane-air mixtures [J]. Journal of Power Technologies, 2011, 91(3): 130-135.
- [16] 邵业涛, 王健平, 唐新猛, 等. 连续旋转爆震发动机流场三维数值模拟[J]. 航空动力学报, 2010, 25(8): 1717-1722.
SHAO Yetao, WANG Jianping, TANG Xinmeng, et al. Three-dimensional numerical simulation of continuous rotating detonation engine flowfields [J]. Journal of Aerospace Power, 2010, 25(8): 1717-1722. (in Chinese)
- [17] Bykovskii F A, Vedernikov E F. Continuous detonation of a subsonic flow of a propellant [J]. Combustion, Explosion and Shock Waves, 2003, 39(3): 323-334.
- [18] LIU Qian, ZHENG Hongtao, YANG Ren, et al. Experimental study on chemical recuperation using hybrid dielectric barrier discharge-catalytic methane-steam reforming [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers: Part A Journal of Power and Energy, 2014, 228(4): 451-461.
- [19] 郑洪涛, 刘倩, 陈曦, 等. 介质阻挡放电辅助甲烷蒸汽重整的实验研究[J]. 热能动力工程, 2014, 29(2): 139-144.
ZHENG Hongtao, LIU Qian, CHEN Xi, et al. Experimental study of the dielectric barrier discharge-aided steam reforming of methane [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2014, 29(2): 139-144. (in Chinese)

(编辑: 王碧琚)