

文章编号:1000-8055(2017)02-0330-07

doi:10.13224/j.cnki.jasp.2017.02.010

旋流流动对水冲压发动机性能影响

刘立静, 李志强

(北京航空航天大学 能源与动力工程学院

航空发动机气动热力国家级重点实验室, 北京 100191)

摘 要: 基于某药柱式水冲压发动机, 建立粉末式水冲压发动机模型. 利用 Fluent 软件模拟研究旋流流动对水冲压发动机流动与燃烧反应性能的影响. 选择 $k-\epsilon$ 双方程模型作为湍流模型, 有限速率/涡耗散模型作为燃烧模型. 基于密度隐式耦合求解进行计算. 结果表明: 添加旋流叶片并增大旋流角度, 燃烧室最高燃烧温度、平均燃烧温度、出口速度和比冲均增大. 研究证明添加旋流叶片对水冲压发动机流动与燃烧反应性能有很大改进, 且旋流角度越大, 效果越明显.

关 键 词: 水冲压发动机; 旋流流动; $\text{Mg}/\text{H}_2\text{O}$ 反应; 燃烧反应; 旋流角度

中图分类号: V221⁺.3; TB553

文献标志码: A

Effects of swirling flow on characteristics of water ramjet engine

LIU Li-jing, LI Zhi-qiang

(National Key Laboratory of Science and Technology on Aero-Engine

Aero-thermodynamics, School of Energy and Power Engineering,

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

Abstract: A swirling-style propellant water ramjet model was established on the basis of a particular model of column-style propellant water ramjet. The effect of swirling flow on the flow and reaction characteristics in the water ramjet was simulated by Fluent software. Turbulent flow simulation was performed using the standard $k-\epsilon$ two equation functions, and combustion reaction was calculated by finite-rate/eddy-dissipation model. The functions were solved by implicit coupling calculation method based on the density. Results show that, adding swirling vanes and increasing the swirling angle can improve the maximum temperature, the average temperature, the outlet velocity and the specific impulse, which proves that adding swirling vanes make drastic improvements of flow and combustion reaction in the water ramjet engine, and the greater swirling angle means the better results.

Key words: water ramjet engine; swirling flow; $\text{Mg}/\text{H}_2\text{O}$ reaction; combustion reaction; swirling angle

鱼雷作为现代化武器隐蔽性好, 威力大, 是海军重要作战武器之一. 未来海战对鱼雷的航速及航程提出了更高要求, 因此对鱼雷动力推进系统性能^[1]的提高成为迫切需求.

鱼雷动力推进系统的发展在经历了压缩空气

(冷动力)驱动^[2], 热动力推进系统驱动^[3], 热电并存推进系统^[4-5]之后, 俄罗斯在其研制的 PAT-52 型鱼雷使用固体火箭发动机推进系统, 为之后固体火箭发动机鱼雷的研制奠定了基础^[6]. 固体火箭发动机推进装置与“超空泡”减阻技术的结合能

收稿日期: 2015-05-19

作者简介: 刘立静(1989—), 女, 硕士生, 主要从事研究水冲压发动机流动与反应数值模拟方面的研究.

引用格式: 刘立静, 李志强. 旋流流动对水冲压发动机性能影响[J]. 航空动力学报, 2017, 32(2): 330-336. LIU Lijing, LI Zhiqiang. Effects of swirling flow on characteristics of water ramjet engine[J]. Journal of Aerospace Power, 2017, 32(2): 330-336.

够满足鱼雷航速上的要求,因此受到各国研发人员的推崇.但由于固体火箭发动机需要自身携带大量的氧化剂,使得鱼雷航程由此受限^[7].水冲压发动机利用从航行器外部进入发动机的海水作为金属燃料燃烧的主氧化剂和发动机的主要工质,可显著降低发动机携带的氧化剂质量,从而贮存更多金属燃料,能量密度可达固体火箭发动机的 3~4 倍.引入外界海水作为原料,同时也解决了固体火箭发动机航程受限的问题,是未来鱼雷动力推进系统的研究方向^[8].

目前水冲压发动机主要分为药柱式水冲压发动机和粉末式水冲压发动机两种.药柱式冲压发动机比冲较高,但是燃料直接在表面燃烧,容易造成结块,燃烧不充分等问题.粉末式水冲压发动机中燃料在燃烧室外,通过燃料供应系统进入燃烧室,具有燃料流量易调节,燃烧效率高,比冲高等优点^[9].然而,为了满足高速流动反应物的反应需求,需要构造低速回流区来稳定火焰.目前工程上常用的稳焰装置有 V 型钝体^[10-11]、突扩^[12]、凹槽^[13]、大速差^[14-15]和强旋流等^[16-17].与其他稳燃装置不同,强旋流稳燃是通过燃烧室的旋流入口引入高强度的流向涡引发展向涡,实现流向涡和展向涡的叠加运动,掺混效果优于其他稳燃装置的单一展向涡混合^[18].目前,粉末式水冲压发动机的研究还处于起步阶段,并且尚鲜有强旋流稳燃装置应用于水冲压发动机的相关研究.为此,本文主要研究了旋流角度对粉末式水冲压发动机燃烧室内流动及反应特性的影响规律.考虑到能与水发生反应的金属燃料中,镁粉和铝粉的能量密度较高,且镁粉较铝粉更易发生反应,本文选择镁粉作为水冲压发动机的金属燃料^[19].

1 几何结构与数值方法

1.1 几何结构

本文研究的粉末式水冲压发动机燃烧室整体结构如图 1 所示,主要分为镁粉进口、氧化剂进口、旋流叶片、燃烧室和出口 5 部分.燃烧室总长为 756mm,进口周向均匀分布 8 个旋流叶片.图 2 为旋流角度 α 分别为 60° , 30° 和 0° 的旋流叶片几何结构.为了保证 3 个模型结构除旋流角度外无任何差别,在没有旋流时仍然画出角度为 0° 的旋流叶片.本文涉及的几何、网格及计算坐标系均为三维直角坐标系,燃烧室轴线沿 Z 轴方向.

1.2 网格划分

采用 ICEM 商用软件,在三维直角坐标系下

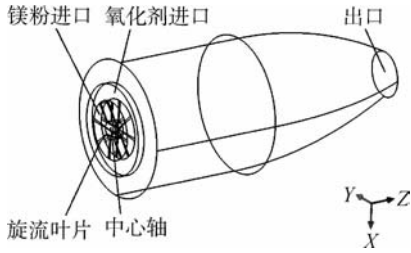


图 1 燃烧室整体结构

Fig. 1 Whole structure of combustion chamber

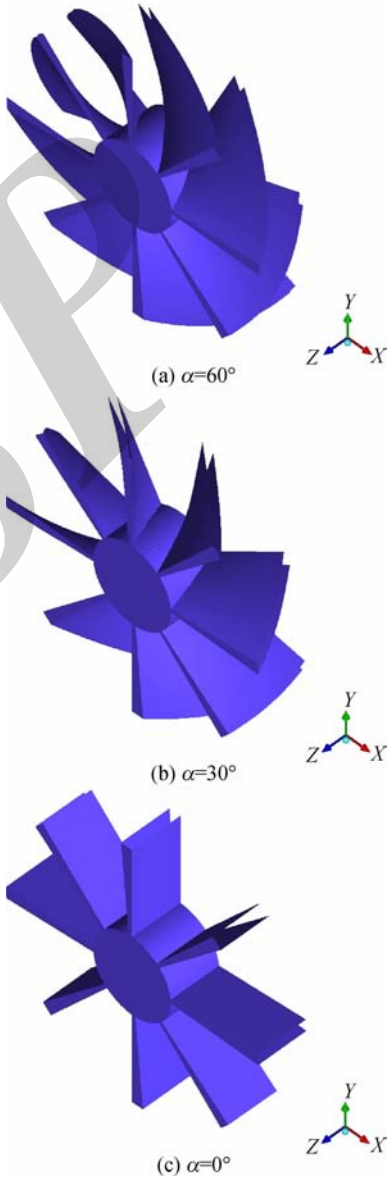


图 2 旋流叶片几何结构

Fig. 2 Swirling vane structure

划分网格.为了保证计算的准确性,3 个燃烧室模型全部划分为结构网格,并保证每条边上所有节点分散一致.先建立“O”型块,之后由外向内依次嵌套下一级“O”型块,直到最内层几何结构.3 个模型网格数均为 63 万,网格划分情况如图 3 所示,其中旋流叶片边界网格如图 4 所示.

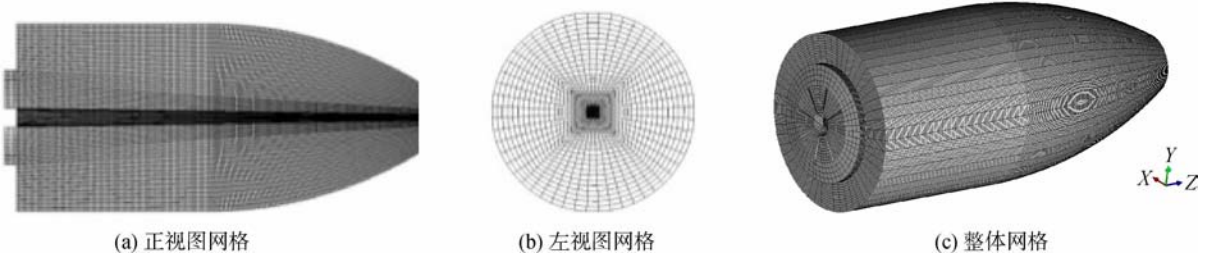


图 3 网格划分图
Fig. 3 Grid cells

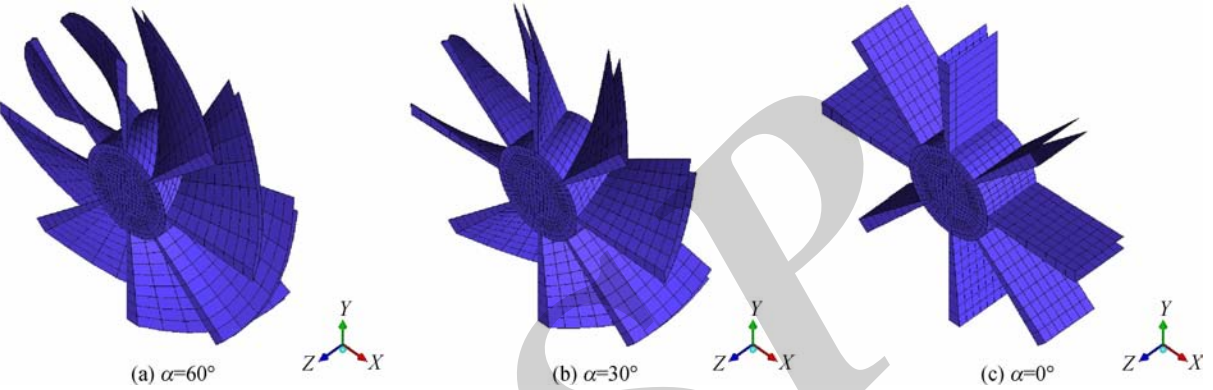


图 4 旋流叶片网格划分图
Fig. 4 Swirling vane grid cells

1.3 边界条件

采用 Fluent 软件计算,金属燃料镁粉作为颗粒相以 DPM(discrete phase model)形式被流动的氮气携带进入燃烧室,镁粉直径设置为 $100\text{ }\mu\text{m}$,并遵守 Rosin-Rammler 分布. 氮气和氧化剂均为速度入口,速度分别是 20 m/s 和 15 m/s ,燃烧室出口为压力出口. 旋流叶片边界及其他壁面按绝热壁面条件处理. 初始化流场温度为 1200 K ,从进口开始计算,将其他进口参数作为整个计算域的初始场.

1.4 计算方法

本文研究的燃烧室模型出口速度最高可达 534 m/s ,马赫数达到 0.57 ,为可压缩流动,因此选择基于密度隐式求解器,连续方程、动量方程和能量方程耦合求解. 选择 SIMPLE (semi-implicit method for pressure-linked equation)算法,先计算 1 阶迎风格式,计算收敛后计算 2 阶迎风格式提高解的精度. 选择标准 $k-\epsilon$ 双方程模型作为湍流模型,该模型适用于模拟旋流流动,已被 Marzouk 等^[20]和饶映明^[21]验证. 按照目前已知的 $\text{Mg}/\text{H}_2\text{O}$ 反应机理,燃烧室内应先发生自持燃烧反应为镁粉相变和镁水化学反应提供热量. 本文并未模拟自持燃烧过程,通过初始化流场温度为

1200 K ,来促使镁粉由固态相变为气态并激发其与水蒸气发生化学反应. 水在入口条件下即为气态,没有相变过程. 镁粉相变采用稳态拉氏离散相模型模拟,并用随机轨道模型考虑颗粒湍流扩散的影响. 初始颗粒直径为 $100\text{ }\mu\text{m}$ 并遵从 Rosin-Rammler 分布. 气态镁与水蒸气的反应为单相燃烧过程,选择有限速率/涡耗散模型,采用 Arrhenius 公式计算化学反应速率,同时用涡耗散模型计算湍流质量扩散速率,取两者的较小值作为燃烧反应速率,既考虑到 Mg 和 H_2O 的化学反应速率,又考虑到旋流带来反应物之间的掺混问题.

2 计算结果及分析

本文主要研究不同旋流角度 ($60^\circ, 30^\circ, 0^\circ$) 对燃烧室内 $\text{Mg}/\text{H}_2\text{O}$ 反应燃烧温度场、速度场、最高马赫数和比冲的影响. 计算过程中, $60^\circ, 30^\circ$ 和 0° 三个模型的算法和边界条件全部一致.

2.1 温度场

燃烧室过轴线纵向剖面 (YOZ 剖面) 温度分布图如图 5 所示. 可以看出,当旋流角度 α 为 60° 时燃烧温度场形状最“饱满”,形成了稳定的反应区域;随着 α 的减小,高温区域减小,当 α 减小至 30° 时高温区域被压缩到中心轴线附近,成狭长形

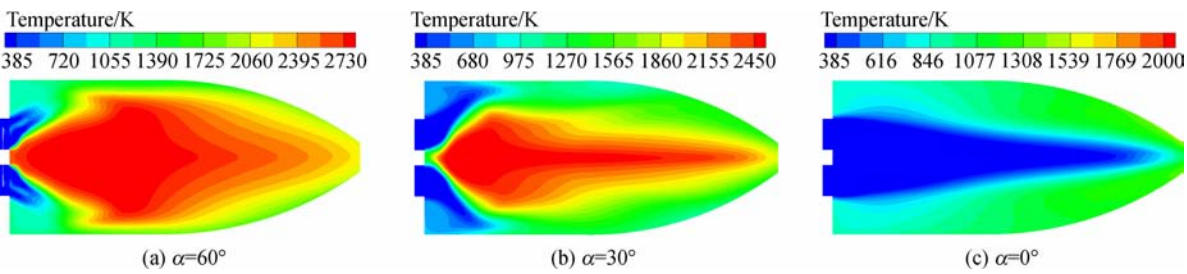


图 5 不同旋流角度纵向剖面温度分布图

Fig. 5 Temperature field of longitudinal section of different swirling angles

分布;继续减小 α 到 0° 时,燃烧高温区域由燃烧室中心转向燃烧室侧壁附近,表明大部分燃料镁粉被携带气体包裹冲出燃烧室。

图 6 为燃烧室最高温度 $T_{\max}$ 与平均温度 T_{av} 的比较图,可以看出,当 α 为 60° 时, $T_{\max}$ 和 T_{av} 分别为 2723 K 和 1801 K,均为最高值.随着 α 的降低, $T_{\max}$ 和 T_{av} 均逐渐降低.这是由于 α 为 60° 时,镁粉和氮气进入燃烧室后,在较强离心力的作用下向燃烧室两侧流动,镁粉与水能够在相对较大的区域内充分掺混并燃烧.当 α 减小到 30° 时,旋流强度降低,镁粉的掺混达不到 60° 时的掺混效果,因此燃烧高温区不够“饱满”.当 α 降到 0° 时,由于没有旋流掺混作用,因此大部分镁粉进入燃烧室后被携带气体包裹直接流动到出口,只有少量镁粉在突扩作用下与水掺混并燃烧,使得燃烧室外侧温度高于中心轴处。

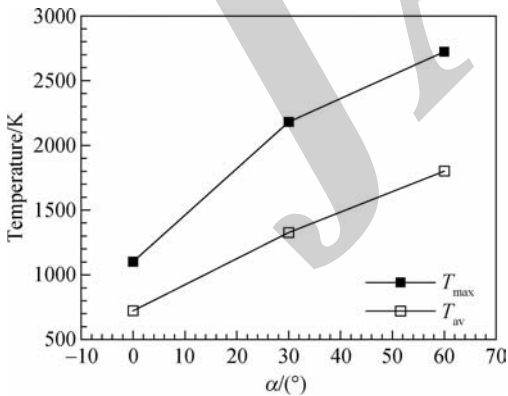


图 6 不同旋流角度下燃烧室最高温度与平均温度分布

Fig. 6 Highest temperature and mean temperature distribution of different swirling angles

2.2 马赫数和速度场

图 7 所示为不同旋流角度 α 对燃烧室内最高马赫数 $Ma_{\max}$ 的影响.从图中可以看出, α 分别为 60° , 30° 和 0° 时,燃烧室内最高马赫数均在 0.3~1.0 之间,因此 3 个流场均为可压缩亚声速流动。

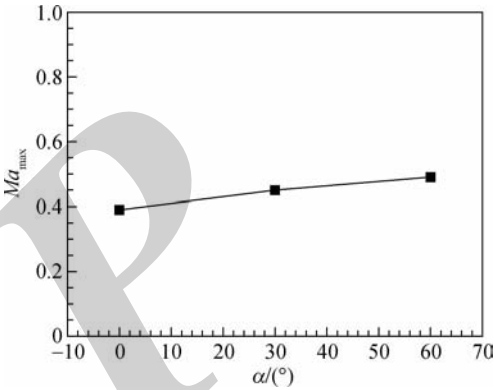


图 7 不同旋流角度下燃烧室最高马赫数

Fig. 7 Highest Mach number of different swirling angles

旋流叶片后 0.24 m 处横向剖面上流线图如图 8 所示.从该图可以看出, α 为 60° 和 30° 时,气流在旋流叶片的导向作用下产生沿切向速度 (V_θ) 形成了流向涡(旋涡方向按右手螺旋法则确定),且 α 越大,切向速度越大;而 α 为 0° 时,相当于没有旋流叶片在切向上的导向作用,流线几乎成放射状,不存在流向涡。

图 9 所示为纵向剖面(剖面位置同图 5)流线图,图中 V_a 为沿轴向速度.由图可见, α 为 60° 和 30° 时,燃烧室进口两侧和轴线附近均产生了展向涡(旋涡方向垂直于流动方向),而 α 为 0° 时,只有进口两侧存在展向涡。

综合图 8 及图 9 可知,在燃烧室中引入旋流流动形成流向涡,高强度的流向涡可引发展向涡,进而实现流向涡和展向涡的叠加.且 60° 时所产生的流向涡和展向涡与 30° 时相比更大更饱满,使反应物得到了更好的掺混效果.这是由于在旋流流动中,只要有切向速度,中心压力必然会低于外围压力,两者压差达到一定程度时,下游气流逆向运动,产生回流,进而形成展向涡.当 α 为 0° 时,不能形成流向涡,所以没有足够大的压差在轴线附近产生展向涡,燃烧室内只有进口两侧由突扩产生的展向涡^[22]。

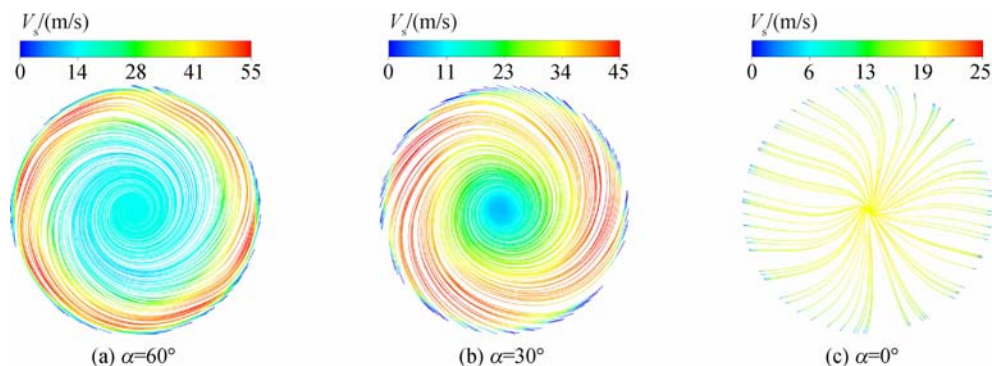


图 8 不同旋流角度下横向剖面流线图

Fig. 8 Streamline of transverse section of different swirling angles

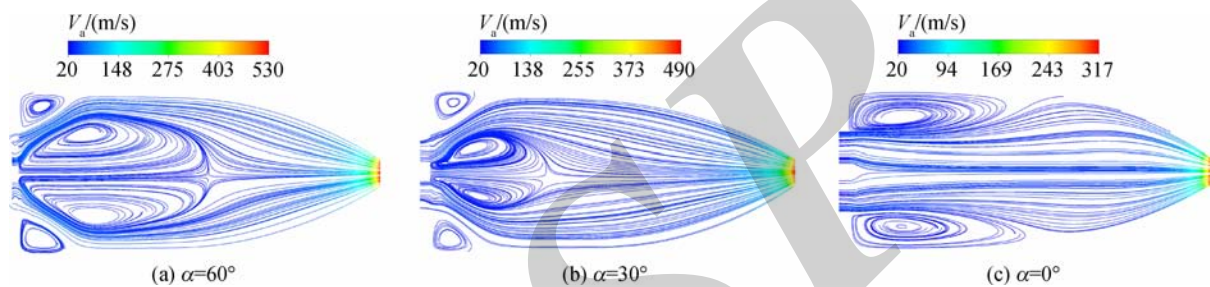


图 9 不同旋流角度纵向剖面流线图

Fig. 9 Streamline of longitudinal section of different swirling angles

结合图 5 所示的温度场分布,可以认为设置镁粉进口为旋流流动有利于促进金属燃料的充分反应,且较大的旋流角度所产生的强旋流流动对镁粉的掺混与反应有着更明显的作用.而突扩旋涡对强化离心作用下扩散到燃烧室壁面附近的镁粉反应有着一定的促进作用.

水冲压发动机主要通过出口处的缩口设计及 $\text{Mg}/\text{H}_2\text{O}$ 反应放出的热能转换成动能来增大出口速度(V_{out}).由图 10 可以看出,旋流角度为 60° 时反应物更好的掺混并放出大量的热,出口速度达到 521 m/s ;当旋流角度降低到 30° 时,由于旋

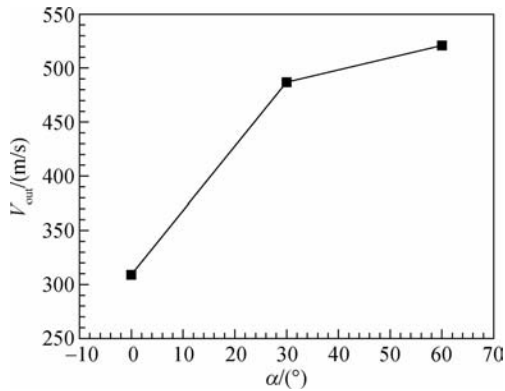


图 10 不同旋流角度时出口速度

Fig. 10 Outlet velocity of different swirling angles

流强度降低,掺混反应减弱,燃烧室出口速度降低至 487 m/s ,降低了 6.53% ;而当旋流角度降低到 0° 时,由于燃烧室中心区域几乎没有掺混,只有少量镁粉扩散到中心区域外在突扩旋涡的作用下发生反应放热,此时的出口速度受反应放热的影响很小,主要受缩口设计的影响,仅为 309 m/s ,相对旋流角度为 30° 时降低了 36.55% .

2.3 比冲

比冲 I_s 是水冲压发动机的基本性能参数,表示燃烧单位质量燃料所产生的推力,是衡量金属燃料能量及发动机性能的重要指标,其计算公式为

$$I_s = \frac{\int_0^{t_b} F dt}{M_p} \tag{1}$$

$$F = \dot{m}(V_{\text{out}} - V_{\text{in}}) - A_{\text{out}}(p_{\text{out}} - p_{\text{in}}) \tag{2}$$

式中 t_b 为水冲压发动机工作时间; F 为水冲压发动机产生的推力; M_p 为金属燃料总质量; $\dot{m}$ 为进口总质量流量; V_{out} 为出口速度; V_{in} 为进口速度; A_{out} 为出口面积; p_{out} 为出口压力; p_{in} 为进口压力.

比冲计算结果如图 11 所示,可以看出,当旋流角度 α 由 0° 提高到 30° 时,比冲由 $2474\text{ N}\cdot\text{s/kg}$ 增加到 $4254\text{ N}\cdot\text{s/kg}$,增加了 71.95% .这是由于

燃烧室旋流进口形成的流向涡引发展向涡,使反应物的掺混增强,强化了镁粉的反应,进而增大了发动机比冲。继续提高旋流强度,当旋流角度增大到 60° 时,旋流进口所形成的流向涡与展向涡的叠加运动区域变大,使得掺混作用进一步增强,反应更加剧烈,导致比冲由 $4\,254\text{ N}\cdot\text{s}/\text{kg}$ 增加到 $4\,595\text{ N}\cdot\text{s}/\text{kg}$,增长 8.02% ,但与旋流角度 α 由 0° 提高到 30° 时比冲的增幅效果相比,旋流角度 α 由 30° 提高到 60° 时的比冲增幅减弱。

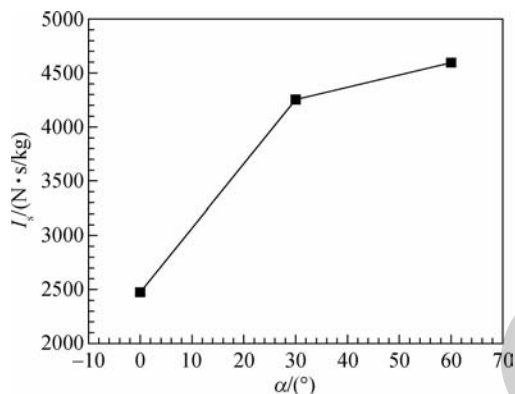


图11 不同旋流角度时比冲

Fig. 11 Specific impulse of different swirling angles

3 结论

1) 与水冲压发动机药柱式燃烧反应不同,本文设计了一种两相流动与燃烧反应相结合的水冲压发动机模型,通过数值模拟方法探讨了镁粉燃料旋流进口的旋流角度对燃烧室流动与反应性能的影响。

2) 与镁粉的直流进口相比,添加旋流叶片可以实现流向涡和展向涡的叠加运动,实现燃料更好的掺混,燃烧温度,出口速度和比冲均有大幅度提高。

3) 当旋流角度 α 由 0° 提高到 30° 时,比冲增加了 71.95% ;而当旋流角度由 30° 增大到 60° 时,比冲增加了 8.02% ,这表明进一步增大旋流强度,可使旋流进口所形成的流向涡与展向涡的叠加运动区域变大,使得掺混作用进一步增强,反应更加剧烈,但比冲增幅在减弱。

4) 本文只探讨了旋流角度为 30° 和 60° 的情况,验证了添加旋流叶片对水冲压发动机的优化作用,但最佳旋流角度有待进一步研究。

参考文献:

[1] 陈兵,张鹏峰,郭昆. 鱼雷热动力技术的发展综述[J]. 推进

技术,2011,32(3):447-450.

CHEN Bing, ZHANG Pengfeng, GUO Kun. Review of the development in torpedo thermal power technologies[J]. Journal of Propulsion Technology, 2011, 32(3): 447-450. (in Chinese)

[2] 西言早,滕刚. 最悠久的鱼雷制造商——白头阿莱尼亚水下系统公司[J]. 兵器知识,2008,9:34-35.

[3] 王树宗,张辉辉,李溢池. 鱼雷热力发动机发展概况及选型研究[J]. 鱼雷技术,2002,10(2):5-9.

WANG Shuzong, ZHANG Zhihui, LI Yichi. The development of the torpedo thermal power engine and the selection of the engine model[J]. Torpedo Technology, 2002, 10(2): 5-9. (in Chinese)

[4] 崔绪生. 国外鱼雷技术进展综述[J]. 鱼雷技术,2003,11(1):6-11.

CUI Xusheng. A summary of progress in torpedo technology over the world[J]. Torpedo Technology, 2003, 11(1): 6-11. (in Chinese)

[5] 桂长清. 电力推进系统与动力电池[J]. 船电技术,2002,3:1-7.

GUI Changqing. Electric power propulsion system and power batteries[J]. Marine Electric and Electronic Engineering, 2002, 3: 1-7. (in Chinese)

[6] 赖贻,齐国英,朱鹏飞. 国外鱼雷动力发展研究[J]. 舰船科学技术,2014,36(8):154-157.

LAI Ming, QI Guoying, ZHU Pengfei. Research on the development of foreign torpedo power system[J]. Ship Science and Technology, 2014, 36(8): 154-157. (in Chinese)

[7] 周杰,王树宗. 超空泡鱼雷推进系统相关问题设计初探[J]. 鱼雷技术,2006,14(5):27-57.

ZHOU Jie, WANG Shuzong. Discussion on design of supercavitating torpedo propulsion[J]. Torpedo Technology, 2006, 14(5): 27-57. (in Chinese)

[8] 罗凯,党建军,王育才,等. 金属/水反应水冲压发动机系统性能估算[J]. 推进技术,2004,25(6):495-498.

LUO Kai, DANG Jianjun, WANG Yucai, et al. System capability estimating for a metal/water reaction fuel ramjet system[J]. Journal of Propulsion Technology, 2004, 25(6): 495-498. (in Chinese)

[9] 韩超. 粉末冲压发动机燃料供应系统研究[D]. 长沙:国防科学技术大学,2006.

HAN Chao. Research on the powder fuel feed system for powered fuel ramjets[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2006. (in Chinese)

[10] Tombazis N, Bearman P W. A study of three-dimensional aspects of vortex shedding from a bluff body with a mild geometric disturbance[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1997, 330: 85-112.

[11] 许欢,李志强,董鹤,等. 气液两相绕流钝体稳燃器的冷态数值研究[J]. 航空动力学报,2014,29(10):2393-2400.

XU Huan, LI Zhiqiang, DONG He, et al. Numerical investigation of gas-liquid two-phase cold-flow around bluff-body stabilized burners[J]. Journal of Aerospace Power,

- 2014,29(10):2393-2400. (in Chinese)
- [12] 赵坚行,胡劲,丁万山,等. 突扩区/火焰筒头部流动特性研究[J]. 航空动力学报,1999,14(1):79-82.
ZHAO Jianxing, HU Jin, DING Wanshan, et al. Aerodynamic characteristics of head in sector annular combustor [J]. Journal of Aerospace Power, 1999, 14(1): 79-82. (in Chinese)
- [13] 周建兴,朴英,陈美宁,等. 三种不同结构超声速燃烧室流场的数值研究[J]. 航空动力学报,2008,2(1):150-155.
ZHOU Jianxing, PIAO Ying, CHEN Meining, et al. Numerical study on flow field in three supersonic combustors [J]. Journal of Aerospace Power, 2008, 2(1): 150-155. (in Chinese)
- [14] 黄晓晴,陈立红,周力行. 大速差射流预燃室内三维回流两相湍流的数值模拟[J]. 力学学报,1990,22(1):28-34.
HUANG Xiaoping, CHEN Lihong, ZHOU Lixing. Numerical modeling of three-dimensional turbulent recirculating gas-particle flows in a combustor of co-flow jets with large velocity difference [J]. Acta Mechanica Sinica, 1990, 22(1): 28-34. (in Chinese)
- [15] 李荣先,赵会全,黄晓晴. 大速差射流燃烧室内三维湍流气固两相流的实验研究[J]. 航空动力学报,1989,4(1):33-36.
LI Rongxian, ZHAO Huiquan, HUANG Xiaoping. Experimental research on 3D turbulent gas-particle flows in a combustor of co-flow jet with large velocity difference[J]. Journal of Aerospace Power, 1989, 4(1): 33-36. (in Chinese)
- [16] David G, Lilley. Swirl flows in combustion: a review[J]. AIAA Journal, 1997, 15(8): 1063-1078.
- [17] 杨茂林. 旋流器后火焰流场的试验研究[J]. 航空学报, 1990, 11(12): 549-556.
YANG Maolin. An experimental study on reacting flow field behind a swirler[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 1990, 11(12): 549-556. (in Chinese)
- [18] GUO Baoyu, Langrish T A G, Fletcher D F. Simulation of turbulent swirl flow in an axisymmetric sudden expansion [J]. AIAA Journal, 2011, 39(1): 96-102.
- [19] 张炜,张为华,周星. 镁基水反应金属燃料[M]. 北京:国防工业出版社,2013.
- [20] Marzouk O A, Huckaby E D. Effects of turbulence modeling and parcel approach on dispersed two-phase swirling flow[R]. San Francisco: The World Congress on Engineering and Computer Science, 2009.
- [21] 饶映明. 高热旋流燃烧器的实验研究及数值模拟[D]. 重庆:重庆大学,2013.
RAO Yingming. Experimental study and numerical simulation on high-heat and swirling gas burner[D]. Chongqing: Chongqing University, 2013. (in Chinese)
- [22] 黄勇,林宇震,樊未军,等. 燃烧与燃烧室[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2009.

(编辑:王碧珺)