

The Design and Research on Water Ramjet Propulsion System of Air-Water Engine

Xiaolong Zhong, Yun Wang, Jusheng Mao

Nanchang Hangkong University, Nanchang Jiangxi

Email: zxlalsace@hotmail.com, wangyun66@126.com, 542725306@qq.com

Received: Aug. 17th, 2016; accepted: Sep. 2nd, 2016; published: Sep. 5th, 2016

Copyright © 2016 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

In order to realize the air/water amphibious engine, a new design of underwater propulsion system based on metal/water reaction is proposed. We establish the preliminary 3D model for metal/water reaction ramjet and choose two mutually independent structural parameters as the objects of study. The flow field simulation of metal/water reaction combustion chamber is conducted with CFD software. The diagrams of the flow field parameters of combustion chamber varying with the change of the structural parameters are obtained. The structural model of metal/water reaction ramjet is determined via the comparison of simulation which could provide the theoretical basis for the further design and optimization of metal/water reaction ramjet.

Keywords

Air-Water Amphibious Engine, Metal/Water Reaction, Simulation and Analysis

水空两用发动机水反应推进系统设计与研究

钟霄龙, 王云, 毛鞠盛

南昌航空大学, 江西 南昌

Email: zxlalsace@hotmail.com, wangyun66@126.com, 542725306@qq.com

收稿日期: 2016年8月17日; 录用日期: 2016年9月2日; 发布日期: 2016年9月5日

摘要

为实现发动机的水空两用，本文提出了一种新型的基于金属水反应的水下推进系统设计。本文结合对金属水反应冲压发动机的初步三维建模，选定了两个相互独立的结构参数作为研究对象，使用CFD软件进行了金属水反应燃烧室的流场模拟仿真。多组赋值后模拟得到了燃烧室平均温度、平均压强和平均速度随着选定结构参数变化的曲线图。本文对比分析了不同参数值的模拟结果，得到了选定结构参数对金属水反应及水冲压发动机推进效果的影响规律，在此基础上，综合考虑各方面要求，最终确定了两个研究参数较为合适的取值，确定了金属水反应冲压发动机结构模型。模拟结果可为水冲压发动机的下一步优化设计提供理论依据。

关键词

水空两用发动机，金属水反应，模拟分析

1. 引言

随着科技和时代的发展，飞行器呈现出越来越多样化的发展势头，多栖飞行器即是这种环境下的产物；另一方面，面对未来战争的需求，只能在天空中飞行的飞机有一定局限性，如果有既能在空中飞行，又能潜入水下航行的水空两用飞机，将会获得特别的作战效能甚至带来新的作战方式的转变，对未来战争的发展具有重要的意义[1]。目前世界上对水空两用飞机的研究的主要目的是为了研制出一种配合潜艇作战的快速武器而进行的，称之为潜射无人机[2] [3]。但严格意义上来讲，潜射无人机并不具备特制的水下动力推进装置，故无法完成潜艇式的水下航行。

要实现两栖飞行器在空中和水下的自由巡航，就必然需要有一个能够水空两用的动力装置，当今世界还鲜有对此水空两用发动机的研究。而水空两用发动机水中动力装置更是重中之重，它决定着两栖飞行器能否实现自由的水中巡航。如何解决水中动力装置的推力产生、燃料和控制等问题，一直是水空两用发动机的研制瓶颈。本设计即是针对水空两用发动机水中动力装置设计。该设计以活泼金属与水反应为基础，在水下航行时利用水冲压原理喷射推进，以实现两栖飞行器的水中自由航行。

2. 水空两用发动机水反应推进系统结构设计

水空两用发动机水中推进系统的核心是活泼金属与水发生剧烈的化学反应，反应生成大量气体(以氢气为主)并产生大量热量，反应生成物高速向后喷出，以此实现持续喷水推进。其推进形式与传统燃烧室类似，故在参考国内外航空发动机燃烧室设计的基础上[4]-[6]，对水空两用发动机水反应推进系统进行了结构设计。

初步设计金属水反应冲压发动机总体结构为圆筒型，前部为水流主入口，筒壁四周沿周向均布四个金属燃料入口，四个金属燃料入口的另一端与环形金属燃料腔联通，环形金属燃料腔的前部沿周向布置四个大小可调的水流辅入口。圆筒内部为金属水反应燃烧室，水金属燃料与水发生的剧烈化学反应主要在此处进行。后部为收敛喷管，金属水反应生成物经由收敛喷管喷出，产生持续动力。

水中工作状态下，发动机前部整流罩开启，金属水反应冲压发动机进入工作状态，水沿中央涵道经由水流主入口进入金属水反应燃烧室；金属燃料腔处的水流辅入口打开，少量水流经此入口进入金属燃料腔进行初步金属水反应，反应生成的热量用来加热固态形式储存的水反应金属，使其成为液态方便反应的进一步进行，反应生成物及熔化的金属燃料一起进入金属水反应燃烧室，与水进一步充分混合发生

剧烈反应，产生大量氢气和能量，反应生成物沿中央涵道喷出，实现持续喷水推进。通过调节水流辅入口阀门大小，可以方便得控制金属燃料的加入速率，从而控制金属水反应的进行程度，达到调节金属水反应发动机推力的目的。

金属水反应冲压发动机总体结构示意图如图 1 所示。

在初步设计中，金属水反应冲压发动机的各项结构设计参数参见表 1 和图 2。

在设计中，初步选定可能影响金属水反应效果的几个水冲压发动机结构参数：金属燃料入口与水入口距离 a ，尾喷口半径 b ，收敛倾斜角 θ 。其中，尾喷口半径 b 和收敛倾斜角 θ 相关联，故最终选取金属燃料入口与水入口距离 a 和尾喷口半径 b 两个互相独立的参数作为研究对象。通过对以上 2 个参数进行多组赋值模拟仿真，比较不同结构参数对金属水反应效果的影响，大致得出影响规律，并选取最有利于金属水反应的结构参数，最终确定金属水反应冲压发动机的具体结构。

3. 水空两用发动机水下推进系统性能仿真分析

3.1. 金属水反应冲压发动机计算模型

本章模拟仿真的计算模型采用上一节中金属水反应冲压发动机的结构设计模型。为对比研究以得出水冲压发动机结构对金属水反应的影响规律，已经选定金属燃料入口与水入口距离 a 和尾喷口半径 b 两个互相独立的参数作为研究对象，通过对 a 和 b 两个参数进行多组赋值模拟仿真来实现对比分析。其中

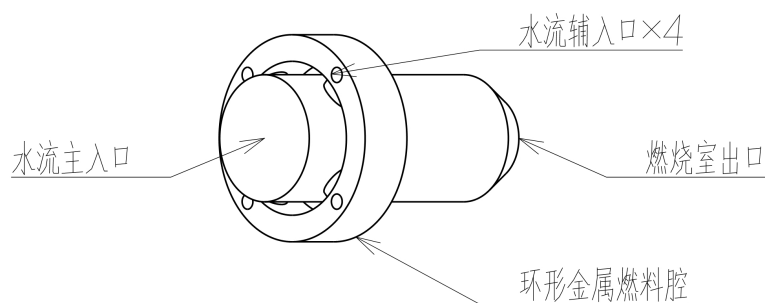


Figure 1. The sketch diagram of metal/ water reaction ramjet
图 1. 金属水反应冲压发动机结构示意图

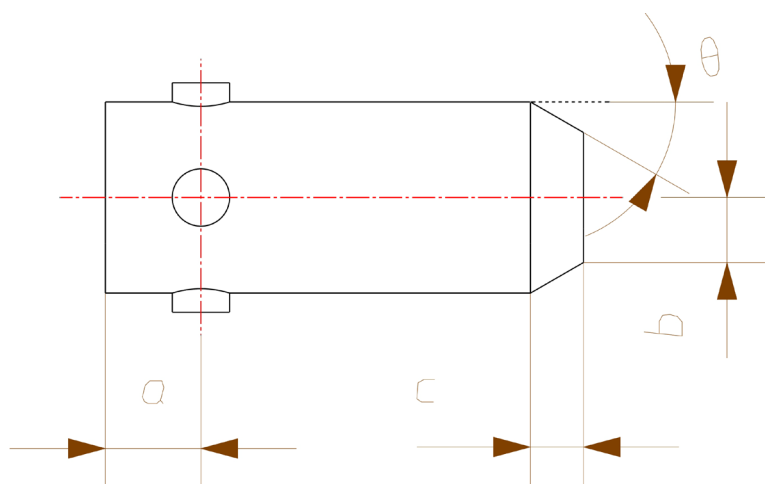


Figure 2. The sketch diagram of Design parameters of metal/water reaction ramjet
图 2. 金属水反应发动机参数设计示意图

金属燃料入口与水入口距离 a 给定三个值: 25 mm, 50 mm, 75 mm。尾喷口半径 b 给定三个值: 27.5 mm (此时收敛倾斜角 $\theta = 40^\circ$), 30 mm (收敛倾斜角 $\theta = 35^\circ$), 34 mm (收敛倾斜角 $\theta = 30^\circ$)。参数 a 和参数 b 两两组合成为一个算例模型, 如此共有九个算例模型, 对这九个模型进行模拟仿真, 得出不同结构参数对金属水反应效果的影响规律, 从而选取最合适的结构参数。

3.2. 网格生成及边界条件

网格是 CFD 模型在空间区域上离散化的几何表达形式, CFD 的模拟与分析都需要在网格的承载下进行。本文使用专业网格生成前处理软件 GAMBIT, 对金属水反应冲压发动机进行了网格划分, 体网格采用非结构化网络, 共生成三维网格数 57,049 至 60,915 个(因参数不同导致计算模型有差异, 故网格数量不同)。网格划分如图 3 所示。

水蒸气入口采用压力入口边界条件, 温度设为 $T = 300\text{ k}$, 金属燃料钠的入口边界条件取壁面 wall 模型, 采用单点射入方式, 壁面温度设为 $T = 1500\text{ k}$ 。两者皆设为离散相, 离散项边界条件选为 reflect。

出口边界条件设置为压力出口, 出口压力由内部流场推出, 表压设为 0, 出口温度 $T = 2500\text{ k}$, 湍流强度 $I = 10\%$, 离散项边界条件选为 escape。流入的介质作为理想气体处理。壁面为固体壁, 采用无滑移条件, 即在壁面处, 平行于壁面的速度为零, 近壁面采用标准壁面函数, 各变量在对称轴处的径向梯度为 0 [7]。

3.3. 金属水反应冲压发动机数值模拟结果与分析

模拟过程中, 对九个算例模型进行了流场数值模拟, 考察不同参数条件下的压力场、温度场及速度场。根据第三章中对水冲压发动机的理论计算, 设定金属燃料钠的质量流量为 1 kg/s 。

3.3.1. 金属燃料入口与水入口距离对水冲压发动机效果影响

为研究结构参数 a 对金属水反应效果的影响, 考察模拟仿真的温度场、压力场及速度场。模拟流场

Table 1. The Design parameters of metal/water reaction ramjet

表 1. 金属水反应冲压发动机初步设计参数

结构	参数
总长度	250 mm
最大外径	100 mm
金属燃料入口与水入口距离	a
尾喷口半径	b
收敛喷管长度	$c = 30\text{ mm}$
收敛倾斜角	θ

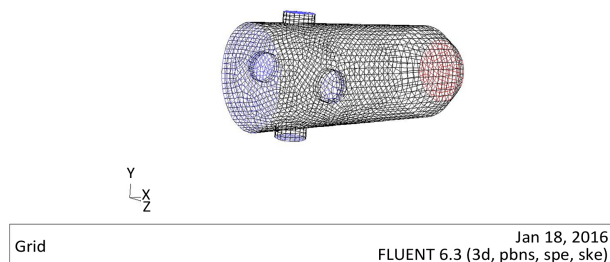


Figure 3. The grid of metal/water reaction ramjet

图 3. 金属水反应冲压发动机网格划分

的平均温度、平均压强、平均速度变化曲线如下:

由图 4 可知:在金属燃料钠质量流量为定值的情况下,随着金属燃料入口与水入口距离的逐步增大,水冲压发动机燃烧室平均温度呈现单调上升态势。在平均温度升高的过程中,曲线的斜率并无明显变化,说明在结构参数 a 增大的过程中,平均温度的升高比较均匀。燃烧室平均温度越高,表示金属水反应的效果越好,同时说明金属燃料钠与水的掺混越均匀,越有利于金属水反应的进行。

由图 5 可知:在金属燃料钠质量流量为定值的情况下,随着金属燃料入口与水入口距离的逐步增大,水冲压发动机燃烧室平均压强呈现单调上升态势。在平均压强升高的过程中,参数 a 从 25 mm 增加到 50 mm 时变化曲线的斜率比从 50 mm 增加到 75 mm 时略大,说明在结构参数 a 增大的过程中,平均压强首先上升得比较急促,而后上升态势趋于平缓。燃烧室平均压强越高,表示金属水反应产生的压力势能没有很好的转化为动能,即流体介质尚未被加速到理想速度就被排出发动机外,减弱了金属水反应冲压发动机的推进效果。

由图 6 可知:在金属燃料钠质量流量为定值的情况下,随着金属燃料入口与水入口距离的逐步增大,水冲压发动机燃烧室平均速度呈现单调下降的态势,且随着参数 a 的增大,平均速度下降的趋势一开始比较平缓,在参数 a 超过 50 mm 后,下降趋势明显变得比较急促。这说明随着参数 a 的增大,水冲压发动机燃烧室的平均动能在减小,流体介质未能在燃烧室内加速至理想速度。

综合图 4、图 5 和图 6 可知:随着金属燃料入口的后移,金属燃料入口与水入口间的距离增大,金属水反应的反应温度上升,平均压强升高,反应效果更好。但同时由于金属燃料入口的后移,导致金属水反应的主反应区域也相应向后移动,反应产生的高压压力势能未能在燃烧室内部充分转化为流体介质的动能,流体介质的加速尚未完成就被排出发动机外,减弱了水冲压发动机的推进效果。综上,若要同时

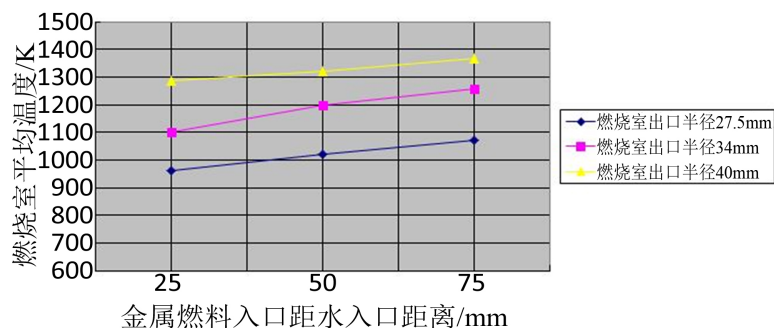


Figure 4. The relationship of average temperature of combustion chamber and parameter a

图 4. 水冲压发动机燃烧室平均温度随结构参数 a 变化曲线

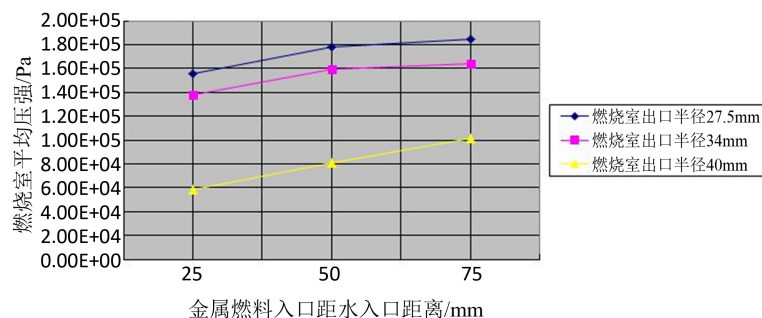


Figure 5. The relationship of average pressure of combustion chamber and parameter a

图 5. 水冲压发动机燃烧室平均压强随结构参数 a 变化曲线

兼顾金属水反应效果和水冲压推进效果，只能对二者折衷，故本文水冲压发动机的金属燃料入口和水入口间的距离选定为 50 mm。

3.3.2. 尾喷口半径对水冲压发动机效果影响

不同尾喷口半径的水冲压发动机燃烧室模拟流场的平均温度、平均压强、平均速度变化曲线如下图：

由图 7 可知：在金属燃料钠质量流量为定值的情况下，随着尾喷口半径的逐步增大，水冲压发动机燃烧室平均温度先是呈现急促上升态势，而后出现了小幅下降，拐点出现在尾喷口半径为 30 mm 时。在尾喷口半径从 27.5 mm 增大到 30 mm 的过程中，燃烧室平均温度上升明显，说明金属水反应程度剧烈，发展态势迅速，反应效果良好；尾喷口半径从 30 mm 增大到 34 mm 的过程中，燃烧室平均温度出现缓慢下降，说明各方面条件已经不适合金属水反应的继续发展，反应程度开始减缓。

由图 8 可知：在金属燃料钠质量流量为定值的情况下，随着尾喷口半径的逐步增大，水冲压发动机燃烧室平均压强先是呈现缓慢上升态势，而后出现了较大幅度下降，拐点出现在尾喷口半径为 30 mm 时。在尾喷口半径从 27.5 mm 增大到 30 mm 的过程中，燃烧室平均压强小幅上升，说明随着金属水反应程度的加剧，压力势能尚未很好地转化为流体动能；尾喷口半径从 30 mm 增大到 34 mm 的过程中，燃烧室平均压强出现急促下降，这一方面是由于金属水反应程度开始减缓，另一方面是因为燃烧室内压力势能更多地转化成了其他形式的能量，使得压力势能降低。

由图 9 可知：在金属燃料钠质量流量为定值的情况下，随着尾喷口半径的逐步增大，水冲压发动机

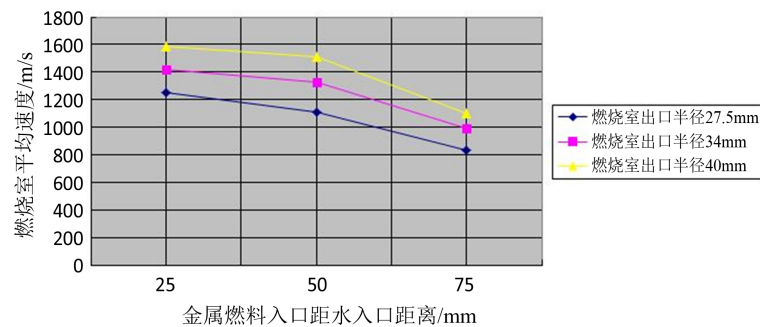


Figure 6. The relationship of average velocity of combustion chamber and parameter a

图 6. 水冲压发动机燃烧室平均速度随结构参数 a 变化曲线

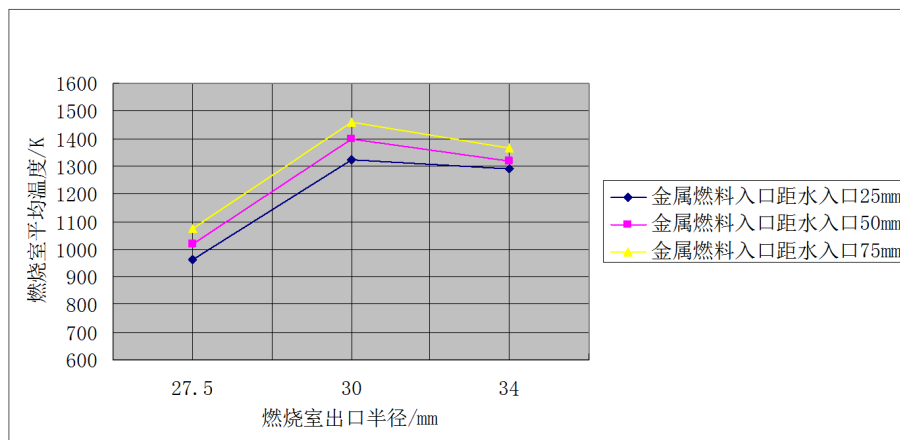


Figure 7. The relationship of average temperature of combustion chamber and parameter b

图 7. 水冲压发动机燃烧室平均温度随尾喷口半径变化曲线

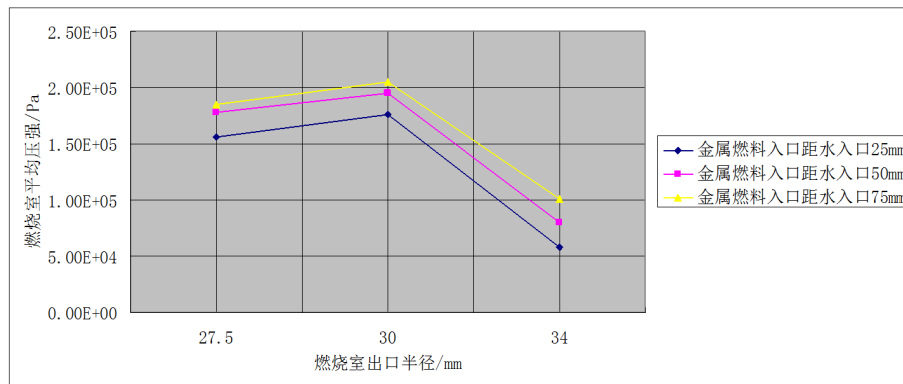


Figure 8. The relationship of average pressure of combustion chamber and parameter b
图 8. 水冲压发动机燃烧室平均压强随尾喷口半径变化曲线

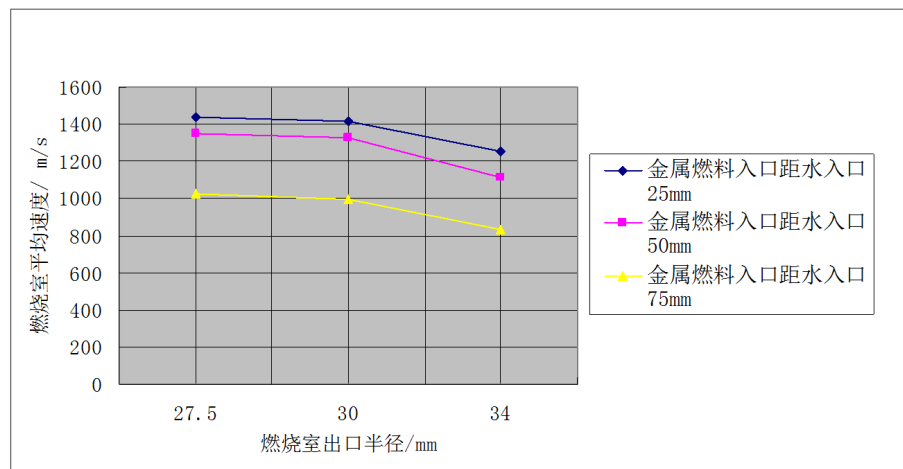


Figure 9. The relationship of average velocity of combustion chamber and parameter b
图 9. 水冲压发动机燃烧室平均速度随尾喷口半径变化曲线

燃烧室平均速度先是呈现比较平缓的下降态势,而后下降幅度加大,拐点出现在尾喷口半径为 30 mm 时。在尾喷口半径从 27.5 mm 增大到 30 mm 的过程中,燃烧室平均速度缓慢下降幅度较小,说明金属水反应产生的能量尚未很好地转化为流体动能;尾喷口半径从 30 mm 增大到 34 mm 的过程中,燃烧室内平均速度下降较明显,是因为随着金属水反应减弱,虽然其他形式能量转化为流体的动能,但无法抵消尾喷口半径加大带来的不利影响。

综合图 7、图 8 和图 9 可知:随着燃烧室尾喷管半径从 27.5 mm 增大至 34 mm,燃烧室内的平均温度、平均压强和平均速度均出现了较明显的拐点。在尾喷口半径从 27.5 mm 增大到 30 mm 的过程中,金属水反应程度加剧,燃烧室内平均温度和平均压强均呈现上升态势,平均速度变化平缓呈现少许下降,当尾喷口半径为 30 mm 时,平均温度和平均压强到达最大值,平均速度变化不大,此时金属水反应效果最好,水冲压发动机推进效果可接受;尾喷口半径从 30 mm 增大到 34 mm 的过程中,金属水反应程度减缓,燃烧室内平均温度、平均压强、平均速度均出现了一定程度下降,此时金属水反应效果和水冲压发动机推进效果均不理想。综上,同时综合金属水反应效果和水冲压发动机推进效果考虑,选定尾喷口半径为 30 mm。

通过以上的模拟仿真,在同时考虑金属水反应效果和水冲压发动机推进效果的基础上,确定金属燃料入口与水入口间的距离 $a = 50$ mm,尾喷口半径 $b = 30$ mm。

4. 结论

1) 本文首先初步设计了水空两用发动机水下模式工作的核心——金属水反应冲压发动机，定性地分析了水冲压发动机在水中的工作状况。确定了水冲压发动机的基本结构参数，并选取了金属燃料入口与水入口距离 a 和尾喷口半径 b 两个互相独立的参数作为模拟仿真的研究对象。

2) 为了比较准确地模拟金属水反应冲压发动机内部流场，首先针对水冲压发动机的特点，选定了较为适合的模型和数值模拟方法。结合对金属水反应冲压发动机的初步三维建模，使用 CFD 前处理软件 Gambit 进行了网格划分，并设置了适合金属水反应的边界条件。

3) 针对选定的两个结构参数，进行了金属水反应燃烧室的流场模拟仿真。多组赋值后模拟得到了燃烧室平均温度、平均压强和平均速度随着选定结构参数变化的曲线图。对比分析了不同参数值的模拟结果，得到了选定结构参数对金属水反应及水冲压发动机推进效果的影响规律，在此基础上，综合考虑各方面要求，最终确定了两个研究参数较为合适的取值，确定了金属水反应冲压发动机结构模型。模拟结果可为水冲压发动机的下一步优化设计提供理论依据。

基金项目

本课题由国家自然科学基金资助，基金号：No. 51266012。

参考文献 (References)

- [1] 朱莎. 水空两用无人机动系统设计与研究[D]: [硕士学位论文]. 南昌: 南昌航空大学, 2012.
- [2] 杨羽. 可变形式混合动力海空飞行器[EB/OL]. <http://hyhxqds.csname.org.cn/zpzs/zxsbzpzs/269386.htm>, 2016-04-12.
- [3] 陈建峰, 杨龙塾. 美国 DARPA 提出的“潜水飞机”概念[J]. 现代舰船, 2009(3): 38-39.
- [4] 卫宝华. 微型燃机燃烧室设计与实验[C]. 中国航空学会第十四届燃烧与传热传质学术交流会议论文集. 沈阳: 中国航空学会第十四届燃烧与传热传质学术交流会, 2007.
- [5] 《航空发动机手册》总编委会. 航空发动机设计手册, 第 9 册, 主燃烧室 [M]. 北京: 航空工业出版社, 2000.
- [6] 李聪, 方蜀州, 方平. 微型涡喷发动机燃烧室数值模拟[J]. 航空动力学报, 2008, 29(5): 0513-0518.
- [7] 安庆友. 金属/水反应燃料冲压发动机热力计算与仿真[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西北工业大学, 2007.

期刊投稿者将享受如下服务:

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>