

## 柔性变形自加压水火箭的推力特性分析

刘龙斌, 丁少哲, 张士峰\*

(国防科技大学 空天科学学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要:** 推力特性直接影响水火箭的发射速度、高度和射程, 为了提高水火箭的推力性能, 基于现有固定容积气压舱, 设计了一种柔性可变形自加压的弹性气压舱方案, 并对其性能进行评估。利用伯努利定理和变形协调关系, 建立了水火箭内部压力、喷口速度与推力的耦合模型。此外, 采用数值计算方法研究了不同初始状态(装水量和充气压力)对水火箭推力的影响规律, 进一步对比分析了相同初始状态下固定体积气压舱与弹性气压舱所产生推力的差异性。研究表明, 改进的柔性可变形弹性气压舱可以有效提高水火箭发射过程中的水流喷射速度, 使相同初始状态下水火箭产生的推力平均值显著提升46.95%。所提方案可为提高水火箭的飞行性能和新型柔性变形水火箭方案的优化设计提供重要参考。

**关键词:** 水火箭; 伯努利定理; 推力特性; 柔性变形; 弹性舱

**中图分类号:** V19 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-2486(2025)03-090-08



论  
文  
拓  
展

## Analysis on the thrust characteristics of flexible deformable self-pressurized water rocket

LIU Longbin, DING Shaozhe, ZHANG Shifeng\*

(College of Aerospace Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** Since the thrust characteristics directly affect the launch speed, altitude and flight range of the water rocket, in order to improve the thrust performance of the water rocket, a flexible and deformable self-pressurized elastic air pressure cabin scheme was designed on the basis of the existing fixed volume pressure chamber, and its performance was evaluated. With Bernoulli's theorem and deformation coordination relation, a coupled model of internal pressure, nozzle velocity and thrust of water rocket was established. Moreover, the influence of different initial states (water volume ratio and inflation air pressure) on water rocket thrust was also studied with the numerical calculation method, and the thrust difference was compared and analyzed further between the fixed air pressure cabin and the elastic air pressure cabin under the same initial conditions. The research results show that the improved flexible and deformable self-pressurized elastic air pressure cabin can effectively increase the water jet velocity during the launch, and the thrust generated by the water rocket in the same initial state increases significantly by 46.95%. The designed scheme can provide important reference for improving the flight performance of water rockets and the optimal design of new flexible deformation water rocket scheme.

**Keywords:** water rocket; Bernoulli's theorem; thrust characteristics; flexible deformation; elastic cabin

水火箭以空气和水作为工作介质, 通过压缩空气使箭体内的液态水快速喷出, 从而产生推力实现发射。水火箭以其结构装置简单、原理直观、实验演示方便、成本低、安全性好等特点, 受到教学和科研领域的广泛关注<sup>[1]</sup>。民用领域中, 基于水火箭原理的产品也有广泛的应用, 例如借助水火箭升空释放滑翔机、航空航天科普活动<sup>[2]</sup>和水

上主题公园的水动力背包等娱乐设施<sup>[3]</sup>。此外, 在军事方面, 水火箭所具有“四无”(无声、无光、无热辐射、无电磁辐射)等特点, 兼之质量轻、取材方便、可与部队特殊情况下的作战需求相匹配, 因此具有一定的军事发展潜力<sup>[4]</sup>。Fischer等<sup>[5]</sup>建立了考虑飞行过程中空气阻力的动力学模型, 并利用伯努利方程推导了水火箭喷口处的水流速

收稿日期: 2023-01-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(12372085); 国防科技大学空天科学学院“拓天”青年人才基金培育资助项目(KY0505072201)

第一作者: 刘龙斌(1986—), 男, 湖南邵东人, 副教授, 博士, 硕士生导师, E-mail: liulongbin@nudt.edu.cn

\*通信作者: 张士峰(1970—), 男, 河南新乡人, 教授, 博士, 博士生导师, E-mail: zhang\_shifeng@hotmail.com

引用格式: 刘龙斌, 丁少哲, 张士峰. 柔性变形自加压水火箭的推力特性分析[J]. 国防科技大学学报, 2025, 47(3): 90-97.

Citation: LIU L B, DING S Z, ZHANG S F. Analysis on the thrust characteristics of flexible deformation self-pressurized water rocket[J].

Journal of National University of Defense Technology, 2025, 47(3): 90-97.

度模型。王超等<sup>[6]</sup>运用质点系力学和热学理论对单级水火箭的推力及最大速度与高度进行了理论建模,研究了初期喷水阶段和后期惯性上升阶段的运动规律。侯沐朗<sup>[7]</sup>构建了捆绑式二级水火箭喷水推进阶段的数学物理模型,获得了最优储水量比、瓶体内部压力对水火箭性能的影响规律。廖立杨等<sup>[8]</sup>基于功能原理推导了水火箭发射初始速度、喷水时间以及射程的理论计算模型,获得了装水体积的最佳值。Utsav等<sup>[9]</sup>研究了水火箭动力学特性,获得了最大高度、最大速度、内部压力等性能参数随时间的变化规律。进一步考虑空气阻力影响,采用 Runge-Kutta 方法构建了固体体积水火箭动力学模型<sup>[5, 10]</sup>,通过数值计算预测了二级水火箭的飞行运动性能,并结合试验获得了水火箭的最佳飞行性能。也有学者通过流动仿真的方法评估水火箭的推力性能,Asao等<sup>[11]</sup>开发了一种基于计算流动力学的水火箭计算模型,可用于估算推力数据及流体-结构的相互作用。

Romanelli等<sup>[12]</sup>经观察试验中的喷口产物,将水火箭的推力段视为热力学问题开展研究,并考虑干空气、水蒸气、蒸汽冷凝以及相应潜热等因素,建立了水火箭气体膨胀过程的多方过程模型,提出了相关热力学参数的解析表达式。Prusa<sup>[13]</sup>给出了一种比耦合偏微分方程更为简单的描述水火箭运动弹道的模型,基于仿真计算与实验数据对比方法,对伯努利方程的使用进行了修正。Al-Qutub等<sup>[14]</sup>基于两相流理论,通过改进喷管并调节液体与气体的质量比获得了水火箭的最优速度。渡边力夫等<sup>[15]</sup>基于半经验公式,利用压力数据得到了推力结果,经试验对比与实际吻合。Barrio-Perotti等<sup>[16]</sup>则介绍了一种利用自由落体试验测量水火箭空气阻力的方法。Toma等<sup>[17]</sup>和陈鹏等<sup>[18]</sup>设计研究了水火箭的飞行稳定及优化方法,并设计了可用于水火箭飞行参数采集的无限数据传输系统。Agrawal等<sup>[19]</sup>为水火箭试验提供了一种不会妨碍水或空气释放的测试装置与方法,提高了水火箭实验的效率。

目前,大部分研究是基于固定体积气压舱(气室)开展了水火箭推力、压力、速度、高度等方面的特性分析,然而固定体积气室内的气压会随气压舱内介质水的不断快速喷出而迅速衰减,导致推进过程中推力大小严重不均匀,严重影响火箭飞行性能。将水火箭气压舱设计成柔性气室可以有效改变气室内部气压变化规律,进而解决这一问题。Jiang等<sup>[20]</sup>分析了杨氏模量等参数对柔

性气囊在受载荷作用下截面几何特性的影响。Chung等<sup>[21]</sup>利用遗传算法,在给定结构尺寸及重量等约束条件下对柔性气囊进行了优化设计,极大提升了缓冲性能。研究表明柔性气囊在各类飞行器中具有很好的应用潜力<sup>[22-24]</sup>,可适用结构变形及压力调节的水火箭飞行器中。

为提高水火箭的推力特性,本文改进了传统水火箭的设计并提出了一种柔性可变形自加压的弹性气压舱,通过建模与仿真,对比研究二者产生推力的差异性,为研制新型柔性变形大推力水火箭提供技术参考和实验指导。

## 1 柔性变形气压舱水火箭模型

柔性变形气压舱水火箭由头罩、柔性气室、尾翼、喷嘴及壳体组成,如图1所示。柔性气室内部装入一定体积的介质水和充入高压空气。发射时,高压空气形成水火箭瓶内外压差,挤压水火箭瓶底的水,使得瓶内的水从喷口处高速喷出,从而形成水火箭的推力。

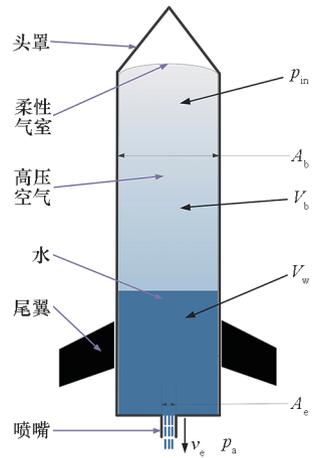


图1 柔性变形气压舱水火箭结构示意图  
Fig.1 Structural diagram of water rocket with flexible deformed pressure chamber

对于传统的固定体积气室的水火箭,考虑到在安全充气气压情况下,水火箭塑料瓶的体积变化不大,一般认为水火箭气室总体积(图1中装水和充气部分的体积之和)保持不变。

固定体积气压舱的水火箭由于体积不变,随着水的喷出,气压舱内的压力迅速降低,水火箭喷嘴处喷水速度下降,从而导致水火箭产生的推力降低。为了解决和缓解水火箭推力快速下降问题,基于固定体积气压舱,本文创新性改进设计并提出了一种柔性变形气压舱水火箭,即水火箭气室总体积是随着内部压力的变化而不断自适应变化的。柔性变形气压舱的柔性气室采用高强度、

高弹性模量的热塑性聚氨酯 (thermoplastic urethane, TPU) 弹性体弹性薄膜构成, 柔性气室随着水的喷出, 气压舱内的气体压力降低的同时, 柔性气室弹性薄膜会同步压缩, 如图 2 所示, 挤压内部空气, 从而减缓气压舱内压力降低的速度, 以缓解水火箭推力的快速下降。相对于相同大小的固定体积的水火箭, 有助于提高水火箭喷水过程中的推力。

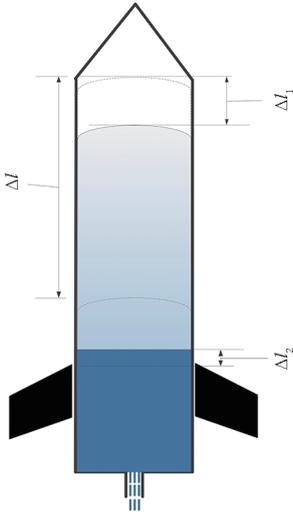


图 2 柔性变形气压舱水火箭体积变化  
Fig. 2 Volume change of water rocket with flexible deformable pressure chamber

为便于研究分析, 假设柔性变形气压舱的柔性气室只沿着水火箭瓶体轴向发生变形, 变形总长度为  $\Delta l$ 。且当某时间段内水火箭喷出一定质量介质水后, 柔性气室内的介质水液面下降高度为  $\Delta l_2$  时, 柔性气室沿着瓶体轴向收缩的长度为  $\Delta l_1$ , 其余部位的几何尺寸在水火箭喷水产生推力过程中视为保持不变。

## 2 水火箭推力规律研究

水火箭产生推力发射前, 需要向柔性气室内充入足够压力的空气 (需要保证瓶体安全), 并装入一定体积的介质水。此时由于水火箭柔性气室内的高压气体和喷嘴处的大气形成压力差, 由伯努利定理知, 发射时瓶体内部的介质水由于压力差会迅速喷出, 从而产生水火箭的推力, 水火箭喷嘴处的喷水速度<sup>[5]</sup>为:

$$v_e(t) = \sqrt{\frac{2(p_{in}(t) - p_a)}{\rho_w}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{A_e}{A_b}\right)^4}} \quad (1)$$

式中,  $v_e$  为水火箭喷嘴处的水流速度,  $p_{in}$ 、 $p_a$  分别为瓶内气体压力和喷嘴处环境压力,  $\rho_w$  为水的密

度,  $A_e$ 、 $A_b$  分别为喷嘴的有效横截面积和柔性气室的横截面积。

由于水火箭在发射过程中, 柔性气室内的高压气体不足以压缩介质水, 因此不考虑水的可压缩性, 水火箭产生的推力主要由喷嘴处的介质水快速喷出产生, 水火箭推力为:

$$T(t) = \dot{m}_e v_e = \rho_w A_e v_e^2(t) \quad (2)$$

为便于建立推力的动态模型, 取水火箭喷水过程中的一小段时间间隔  $\Delta t$ , 认为喷水瞬间过程分为两个阶段进行, 包括绝热膨胀过程和柔性气室压缩等温过程, 其中绝热膨胀阶段所用时间为  $\Delta t'$ 。

水火箭柔性气室内的气体膨胀状态变化可视为绝热过程, 满足绝热气体状态方程<sup>[1,5-7]</sup>:

$$p_{in}(t + \Delta t') V_a^\gamma(t + \Delta t') = p_{in}(t) V_a^\gamma(t) \quad (3)$$

式中,  $\gamma$  为气体比热容, 大小取值与柔性气室内外压差有关<sup>[5]</sup>:

$$\gamma = 1.15 + 0.25 \exp\left(-36 \frac{p_{in}(t + \Delta t')}{p_a}\right) \quad (4)$$

由于单位时间内喷出水体积对气压舱内气体的密度变化影响较小, 为了简化物理模型, 忽略气压舱内的气体可压缩性<sup>[6,8,10]</sup>, 因此柔性气室内的高压气体的体积随着介质水的喷出发生相应的变化:

$$V_a(t + \Delta t') = V_a(t) + v_e \Delta t A_e \quad (5)$$

然而, 随着柔性气室内的水从水火箭喷嘴处喷出, 柔性气室内的充气压力在绝热膨胀降低的同时, 柔性气室由于有弹性, 其底部沿着水火箭轴向压缩 (底部降低)。不考虑柔性气室底部的变形速度影响, 则柔性气室内部的充气压力与柔性气室承受的压力保持平衡, 即:

$$p_{in}(t + \Delta t) = E \cdot \Delta l(t + \Delta t') \quad (6)$$

式中,  $E$  表示柔性气室沿水火箭轴向方向 (弹性伸缩或变形方向) 的线弹性模量,  $\Delta l(t)$  为柔性气室沿着水火箭瓶体轴向于  $t$  时刻所发生的变形量。

由于柔性气室内的温度来不及变化, 此柔性气室压缩过程可视为等温过程:

$$p_{in}(t + \Delta t) V_a(t + \Delta t) = p_{in}(t + \Delta t') V_a(t + \Delta t') \quad (7)$$

$$V_a(t + \Delta t) = A_b \cdot \Delta l(t + \Delta t') \quad (8)$$

$$\Delta l_1(t + \Delta t) = \Delta l(t + \Delta t) - \Delta l(t) \quad (9)$$

由此获得水火箭开始喷水后,  $t + \Delta t$  时刻柔性气室内部的气体压力和气体体积, 进而获得柔性气室内的剩余水体积及初始装水量之比:

$$V_w(t + \Delta t) = V_w(t) - v_e \Delta t A_e \quad (10)$$

$$K = \frac{V_w(t=0)}{V_a(t=0) + V_w(t=0)} \quad (11)$$

由时间间隔  $\Delta t$  前后水体积的变化量与柔性气室横截面积  $A_b$  可得箭体中液面下降高度如式(12)所示。

$$\Delta l_2(t + \Delta t) = \frac{V_w(t + \Delta t) - V_w(t)}{A_b} \quad (12)$$

式(12)中水火箭喷出瓶体内介质水产生推力过程中,瓶体保持竖直方向不变,瓶体内液面下降高度与喷出水的体积直接相关,喷出水的体积与水火箭喷嘴处的水流速度相关,可以进一步表示为:

$$\Delta l_2(t + \Delta t) = \frac{v_e \Delta t A_e}{A_b} \quad (13)$$

将式(5)代入并更新方程式(1)进一步获得水火箭喷水的速度,相应的水火箭产生的推力进一步表示为:

$$T(t + \Delta t) = \dot{m}_e v_e(t + \Delta t) = \rho_w A_e v_e^2(t + \Delta t) \quad (14)$$

### 3 水火箭推力特性分析

根据建立的柔性变形气压舱水火箭的推力特性模型,为进一步研究柔性气室对水火箭推力大小以及变化规律的影响,根据所建立的模型开展了数值仿真计算,对水火箭的推力特性及影响规律进行分析。数值仿真中,水火箭的相关参数如表1所示,符号中的  $(t = 0)$  表示初始状态下的参数。

表1 水火箭仿真参数

Tab.1 Simulation parameter of the water rocket

名称	符号	数值	单位
柔性气室弹性模量	$E$	$4.50 \times 10^9$	$\text{Pa} \cdot \text{m}^{-1}$
箭体结构质量	$M_k$	0.55	kg
喷嘴面积	$A_e$	$4.42 \times 10^{-5}$	$\text{m}^2$
柔性气室面积	$A_b$	$7.90 \times 10^{-3}$	$\text{m}^2$
喷嘴处环境压力	$p_a$	$1.01 \times 10^5$	Pa
箭体总容积	$V_0(t=0)$	$2.13 \times 10^{-3}$	$\text{m}^3$
瓶内气体压力	$p_m(t=0)$	$7.00 \times 10^5$	Pa
瓶内气体体积	$V_a(t=0)$	$1.21 \times 10^{-3}$	$\text{m}^3$
瓶内水的体积	$V_w(t=0)$	$9.20 \times 10^{-4}$	$\text{m}^3$
瓶内水的质量	$m_w(t=0)$	0.92	kg

#### 3.1 推力 - 时间变化特性

水火箭推力随时间变化曲线如图3所示,图

中虚线表示应用了柔性变形气压舱的水火箭的推力随时间变化,实线表示传统普通水火箭(固定体积气压舱)的推力随时间变化。

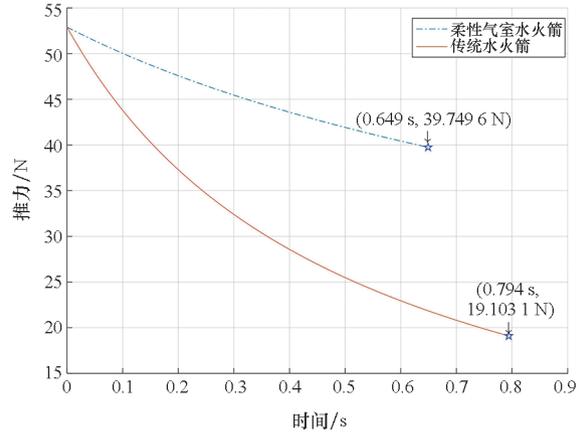


图3 水火箭推力随时间变化对比曲线

Fig.3 Comparison curve of water rocket thrust with time

由图3可得,两种水火箭的推力变化趋势相近,均会随着水火箭发射后喷水的时间延长而逐渐降低。与传统普通固定体积水火箭相比,应用柔性变形气压舱后,水火箭推进段的持续时间由0.794 s减少为0.649 s,减少了18.3%,但推力衰减速度得到了极大降低。由于自加压作用,推力衰减速率明显改善,并且在水火箭发射后的推进段能够全程均保持较大的推力,在相同水火箭重量情况下,水火箭可以飞得更高,性能更优。

在推进段结束时,应用柔性变形气压舱的水火箭推力为39.7496 N,推力下降率仅  $20.26 \text{ N} \cdot \text{s}^{-1}$ ,与初始推力相比,减幅为24.86%;而传统普通固定体积水火箭推进段结束时推力大小为19.1031 N,推力下降率为  $42.56 \text{ N} \cdot \text{s}^{-1}$ ,减幅达63.89%。与传统普通固定体积水火箭气压舱相比,应用柔性变形自加压气压舱可使水火箭推进段全程的推力平均值提升46.95%。

根据式(1)与式(14)可得:

$$T(t + \Delta t) = \rho_w A_e v_e^2(p_{in}, p_a) \quad (15)$$

可知水火箭的推力大小取决于三个因素:水的密度、喷嘴面积与喷嘴的喷水速度。在实际飞行中,前两个参数通常为恒定值,因此水火箭推力大小最终取决于水火箭喷嘴的喷水速度,且喷水速度与瓶内压力及喷口处压力密切相关。

#### 3.2 喷水速度 - 时间变化特性

图4为水火箭喷水速度随时间的变化曲线。根据3.1节的分析,无论是柔性变形气压舱水火箭还是传统普通固定体积水火箭,水火箭的喷水速度变化趋势与推力随时间变化趋势保持一致,均随着

发射后飞行过程气压舱内水的喷出而逐渐下降,区别在于相关参数变化率以及参数减幅的不同。

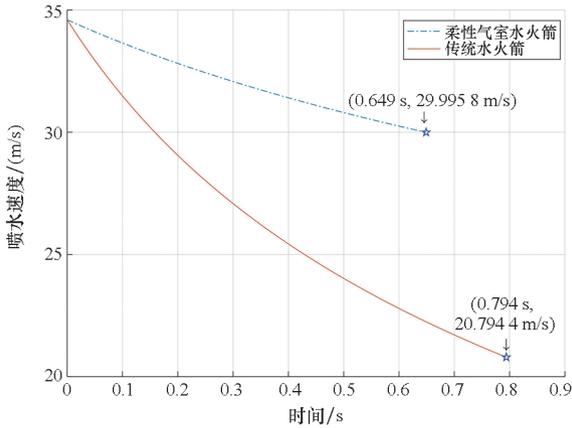


图 4 水火箭喷水速度随时间变化曲线

Fig. 4 Time varying curve of water jet velocity of water rocket

由式(15)可知,水火箭喷口处喷水速度与内部压强直接相关,因此喷水速度的变化趋势为随着舱内气压降低而降低。

根据柔性气室弹性变形规律,柔性变形气压舱的水火箭气室总体积会随着内部压力的变化而不断自适应变化。在水喷出的同时,气压舱内的气体压力降低,而柔性气室弹性薄膜则会发生弹性形变,同步压缩,减小气室总体积,挤压内部空气,从而减缓了气压舱内的压力降低的速度。

由于柔性气压舱的弹性薄膜起到了减缓气压舱内压力降低速度的作用,应用了柔性变形气压舱的水火箭喷水速度下降较慢,在推进段结束时喷水速度为 29.995 8 m/s,下降了 13.31%;而传统普通固定体积水火箭推进段结束时喷水速度仅为 20.794 4 m/s,下降了 39.91%。

### 3.3 不同初始参数下推力变化特性分析

为探究水火箭各项参数变化对其推力产生的影响,针对初始装水量、初始充气压力以及柔性气室材料的弹性模量这三个变量分别进行了仿真,获得了不同情况下柔性变形气压舱水火箭的推力特性并进行分析。

#### 3.3.1 不同初始装水量下的推力变化

初始装水量的增加,在一定程度上可以提高水火箭推进段的持续时间,但也会导致其推力值有所减小。不同初始装水量条件下的仿真结果如表 2 所示,其余参数与前文保持不变。

当初始装水量低时,水火箭推进段的持续时间很短,大多数液体水受较高的内部压强作用而喷出,产生的推力较大;而当初始装水量较大时,

由于内部气压的迅速下降,多数液体水受较小的内部压强作用而喷出,因此产生的推力小于前一种情况,这导致水火箭全程推力大小的平均值随初始装水量的增加而不断减小,具体如图 5 所示。

表 2 不同初始装水量水火箭仿真结果

Tab. 2 Simulation results of water rockets with different initial water load

序号	体积/m <sup>3</sup>	初始装水量之比 K	推进时长/s
1	$1.02 \times 10^{-3}$	0.478 9	0.730
2	$1.12 \times 10^{-3}$	0.525 8	0.814
3	$1.22 \times 10^{-3}$	0.572 8	0.903
4	$1.32 \times 10^{-3}$	0.619 7	0.999
5	$1.42 \times 10^{-3}$	0.666 7	1.103
6	$1.52 \times 10^{-3}$	0.713 6	1.220

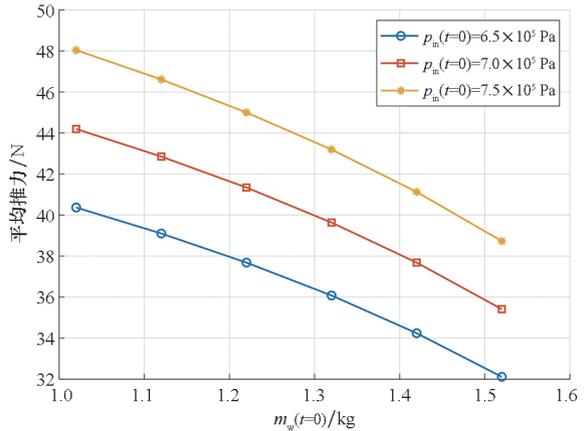


图 5 推力平均值随初始装水量变化曲线

Fig. 5 Average thrust change curve with initial water load

在不同初始装水量的情况下,水火箭全程推力变化曲线如图 6 所示,箭体速度变化曲线如图 7 所示。

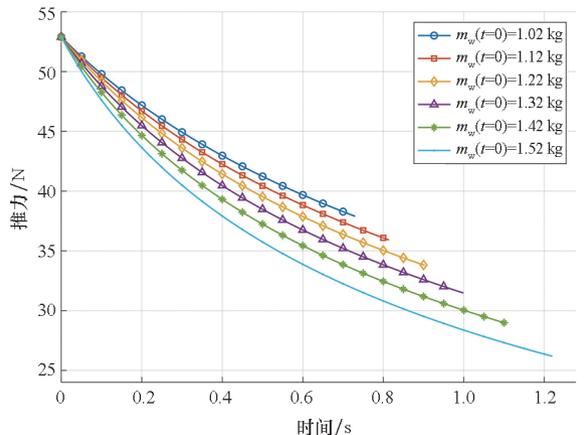


图 6 不同初始装水量下的推力变化曲线

Fig. 6 Thrust change curve under different initial water load

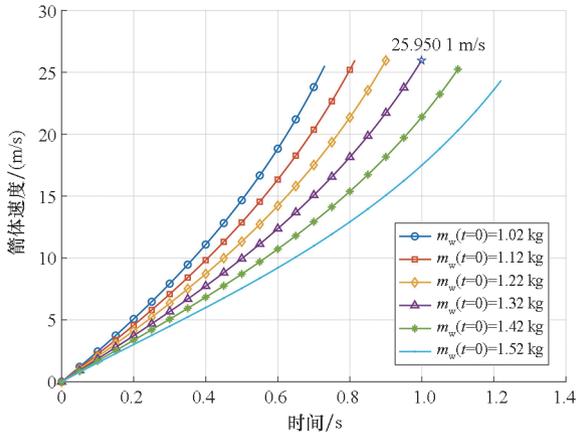


图7 不同初始装水量下的箭体速度变化曲线  
Fig. 7 Arrow velocity change curve under different initial water load

在初始装水量 1.32 kg 时,其推力下降速度为  $21.44 \text{ N} \cdot \text{s}^{-1}$ ,与 3.1 节的情况相比推力下降较快,其平均推力为  $39.6328 \text{ N}$ ,降低了 12.73%,但由于推进的总时间增加了,因此能达到的最大速度反而增加。由图 7 可知,改变初始装水量对水火箭所能达到的最大速度影响有限,图中的 5 个初始装水量条件下,水火箭最大速度均为 25 m/s 左右。初始装水量 1.32 kg 的情况下,水火箭速度最大值为 25.9501 m/s,略微优于其他初始装水量条件。因此分析认为,水火箭所能达到的最大速度的决定因素是初始充气压力。

### 3.3.2 不同初始充气压力情况下的推力变化

不同初始充气压力下的仿真结果如表 3 所示。水火箭推力大小随着初始充气压力的增大而增大,但过大的初始充气压力将导致水被快速耗尽,推进时长缩短,具体如图 8 所示。

表 3 不同初始充气压力水火箭仿真结果

Tab. 3 Simulation results of water rockets with different initial inflation pressure

序号	充气压力/MPa	推力均值/N	推进时长/s
1	0.60	37.594 4	0.713
2	0.65	41.501 4	0.679
3	0.70	45.415 6	0.649
4	0.75	49.338 9	0.622
5	0.80	53.255 2	0.599

图 9 为不同初始充气压力下的箭体速度变化曲线。由图 9 可知,综合推力值与推进时长二者的影响,通过提升初始充气压力可有效实现提高火箭推进段最大速度的目标。

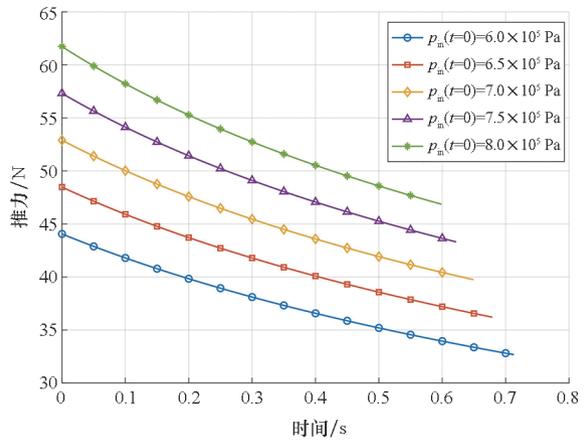


图 8 不同初始充气压力下的推力变化曲线  
Fig. 8 Thrust change curve under different initial inflation pressure

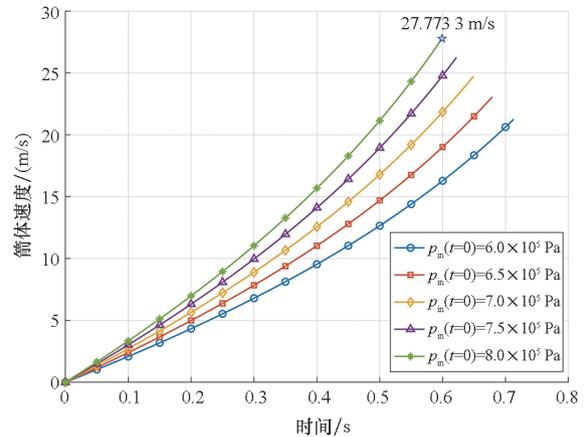


图 9 不同初始充气压力下的箭体速度变化曲线  
Fig. 9 Arrow velocity change curve under different initial inflation pressure

### 3.3.3 不同弹性模量情况下的推力变化

柔性变形气压舱水火箭中,弹性薄膜材料的弹性模量决定了柔性气室同步压缩内部空气的快慢与范围,而减缓气压舱内压力降低的速度能缓解水火箭推力快速下降,因此弹性模量是决定水火箭推力特性的重要设计参数。设置弹性模量为  $2.8 \sim 4.8 \text{ GPa} \cdot \text{m}^{-1}$ ,得到不同弹性模量情况下平均推力的变化如图 10 所示。

图 10 反映了在  $6.5 \times 10^5 \text{ Pa}$ 、 $7.0 \times 10^5 \text{ Pa}$  和  $7.5 \times 10^5 \text{ Pa}$  三种不同的初始充气压力下,水火箭柔性气室材料的弹性模量对箭体受到推力大小平均值的影响情况。由图 10 可得,水火箭所受推力平均值受初始充气压力的影响更为明显,材料弹性模量的影响程度有限。而在同一初始充气压力的条件下,应用弹性模量更高即刚度更高的薄膜材料制作柔性气室,会使水火箭所受推力总体呈现下降趋势,且存在下降速度不同的分界点。对于上述三种初始充气压力的条件下,当弹性模量小于

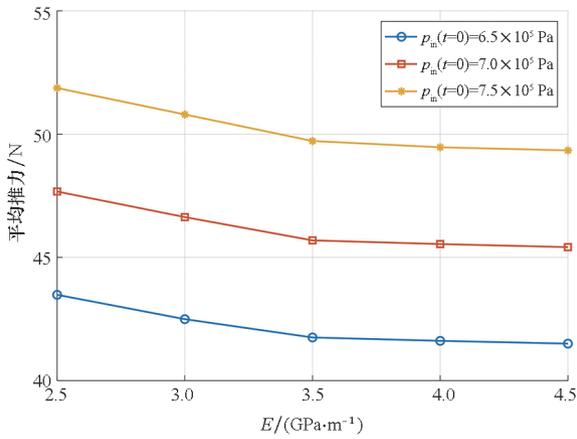


图 10 推力平均值随弹性模量变化曲线

Fig. 10 Average thrust change curve with elasticity modulus

3.5  $\text{GPa} \cdot \text{m}^{-1}$ 时,平均推力会随着弹性模量的增大而快速降低;而当弹性模量大于  $3.5 \text{GPa} \cdot \text{m}^{-1}$ 时,水火箭推力变化幅度较小。

图 11 为不同弹性模量情况下水火箭推力随时间的变化曲线。随着材料弹性模量的增加,柔性气室压缩内部空气的能力增强,因此内部压力的降低速度减缓,导致推进段时间长度也随之增加。但当弹性模量增加至大于  $3.5 \text{GPa} \cdot \text{m}^{-1}$ 后,可以看到推进段时间长度几乎不再增加,这是由于舱内装水量有限,即使气室内仍具有较高压强但已缺少足够的液体提供推力,所以此时再提升弹性模量带来的增益较低。

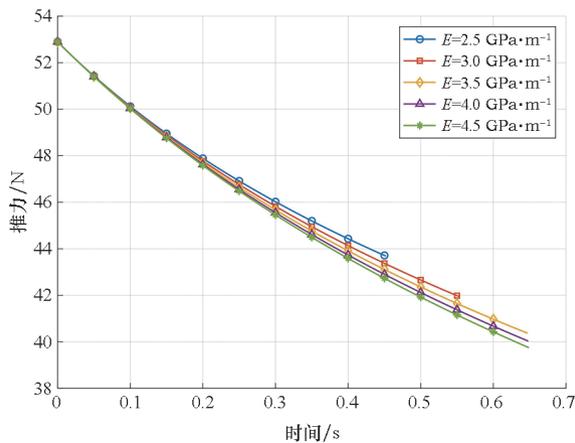


图 11 不同弹性模量下的推力变化曲线

Fig. 11 Thrust variation curves under different elasticity modulus

将不同弹性模量情况下的仿真结果总结如表 4 所示。当弹性模量小于  $3.5 \text{GPa} \cdot \text{m}^{-1}$ 时,弹性模量每减小  $1 \text{GPa} \cdot \text{m}^{-1}$ ,水火箭推进段过程的推力均值增加约  $2 \text{N}$ ;当弹性模量大于  $3.5 \text{GPa} \cdot \text{m}^{-1}$ 时,弹性模量每减小  $1 \text{GPa} \cdot \text{m}^{-1}$ ,水火箭推进段过程的推力均值增加约  $0.2 \text{N}$ 。

表 4 不同弹性模量水火箭仿真结果

Tab. 4 Simulation results of water rocket with different elasticity modulus

序号	弹性模量/ $(\text{GPa} \cdot \text{m}^{-1})$	推力均值/ $\text{N}$	推进时长/ $\text{s}$
1	2.5	47.671 6	0.452
2	3.0	46.634 4	0.553
3	3.5	45.689 8	0.647
4	4.0	45.539 9	0.648
5	4.5	45.415 6	0.649

### 4 结论

重点研究了柔性变形气压舱的应用对水火箭推力特性的影响,从推力随时间的变化与喷水速度变化两个方面分别分析了传统普通固定体积水火箭与带柔性变形气压舱水火箭的推力特性。同步研究了初始装水量、初始充气压力以及气室材料弹性模量三个参数对水火箭推力特性的影响效果,主要结论如下:

1) 与传统普通固定体积水火箭相比,应用柔性变形气压舱可使水火箭推进段全称的推力平均值提升  $46.95\%$ ;柔性气室可较好地减缓气压舱内压力降低的速度,应用了柔性变形气压舱的水火箭在推进段结束时喷水速度下降了  $13.31\%$ ,而传统普通固定体积水火箭下降了  $39.91\%$ 。

2) 与传统普通固定体积水火箭相比,应用了柔性变形气压舱后,为取得更优效率,初始可以选择装载更多水。

3) 水火箭推力大小随着初始充气压力的增大而增大,但过大的初始充气压力将导致水被快速耗尽,推进时长缩短。

4) 弹性模量小于  $3.5 \text{GPa} \cdot \text{m}^{-1}$ 时,气室薄膜材料弹性模量的增加会使柔性气室压缩内部空气的能力增强,导致推进段时间长度随之增加;弹性模量大于  $3.5 \text{GPa} \cdot \text{m}^{-1}$ 后,增益不明显。

### 参考文献 (References)

[1] 刘鲁华, 邹东升, 陈克俊. 导弹工程专业“水火箭”案例设计与思考[J]. 高等教育研究学报, 2014, 37(3): 84-87.  
LIU L H, ZOU D S, CHEN K J. Design and thinking of “water rocket” case for missile engineering major[J]. Journal of Higher Education Research, 2014, 37(3): 84-87. (in Chinese)

[2] 王晓翔, 王中贺. 水火箭无动力滑翔机设计[J]. 中阿科技论坛, 2020(4): 137-138.  
WANG X X, WANG Z H. Water rocket unpowered glider design [J]. China-Arab States Science and Technology

- Forum, 2020(4): 137 – 138. (in Chinese)
- [3] LIU X M, ZHOU H. Unmanned water-powered aerial vehicles: theory and experiments[J]. IEEE Access, 2019, 7: 15349 – 15356.
- [4] 张刚, 王建明, 林泽明. 浅析水火箭在特种作战中的运用[J]. 百科论坛电子杂志, 2020(12): 1343.  
ZHANG G, WANG J M, LIN Z M. Brief analysis application of water rocket in special operations [J]. Encyclopedic Forum, 2020(12): 1343. (in Chinese)
- [5] FISCHER L, GUNTHER T, HERZIG L, et al. On the approximation of DIY water rocket dynamics including air drag[EB/OL]. (2020 – 01 – 31) [2022 – 10 – 20]. <https://arxiv.org/pdf/2001.08828>.
- [6] 王超, 金盈楠, 谢妙, 等. 水火箭运动的理论研究[J]. 物理通报, 2017(6): 24 – 27.  
WANG C, JIN Y N, XIE M, et al. Theoretical study on the movement of the water rocket [J]. Physics Bulletin, 2017(6): 24 – 27. (in Chinese)
- [7] 侯沐朗. 模块化多级水火箭设计与模拟[J]. 兵器装备工程学报, 2016, 37(9): 188 – 192.  
HOU M L. Design and simulation of modular multistage water rocket [J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2016, 37(9): 188 – 192. (in Chinese)
- [8] 廖立杨, 杨晓冬. 对水火箭发射速度和射程的理论研究[J]. 物理与工程, 2016, 26(3): 82 – 86.  
LIAO L Y, YANG X D. Theoretical investigation of the launch initial velocity and the launch distance for the water rocket[J]. Physics and Engineering, 2016, 26(3): 82 – 86. (in Chinese)
- [9] UTSAV K C, ALNOUTI R, MUFLEHI M. Prediction of water rocket performance [C]//Proceedings of the Advances in Science and Engineering Technology International Conferences (ASET), 2020: 1 – 5.
- [10] CHANG F Y, WENG H C. Dynamic characteristic analysis of a two-stage water rocket in flight[J]. Journal of the Chinese Society of Mechanical Engineers, 2020, 41(5): 605 – 614.
- [11] ASAO S, YAMAKAWA M, SAWANOI K, et al. Flight simulation of water rocket [J]. International Journal of Computational Methods, 2022, 19(7): 2141017.
- [12] ROMANELLI A, BOVE I, GONZÁLEZ MADINA F. Air expansion in a water rocket[J]. American Journal of Physics, 2013, 81(10): 762 – 766.
- [13] PRUSA J M. Hydrodynamics of a water rocket[J]. SIAM Review, 2000, 42(4): 719 – 726.
- [14] AL-QUTUB A, TALEB J, MOKHEIMER E M A. A novel approach for optimizing two-phase flow in water rockets: part I [J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2014, 39(4): 3169 – 3180.
- [15] 渡边力夫, 富田信之, 竹前俊昭. 水火箭の推力特性制御の一方法[J]. 日本航空宇宙学会論文集, 2003, 51(593): 314 – 320.  
WATANABE R, TOMITA N, TAKEMAE T. Thrust characteristics of water rocket and their improvement [J]. Journal of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, 2003, 51(593): 314 – 320. (in Japanese)
- [16] BARRIO-PEROTTI R, BLANCO-MARIGORTA E, ARGÜELLES-DÍAZ K, et al. Experimental evaluation of the drag coefficient of water rockets by a simple free-fall test[J]. European Journal of Physics, 2009, 30(5): 1039 – 1048.
- [17] TOMA E, ITO Y. The method for optimum design of water rocket flight stability performance conditions using CAE with T method and robust parameter design[J]. Journal of Applied Mathematics and Physics, 2021, 9(11): 2669 – 2697.
- [18] 陈鹏, 黄宇新, 张宇智, 等. 基于无线数据传输的水火箭动态监测系统的设计与实现[J]. 物理通报, 2022(5): 134 – 135, 139.  
CHEN P, HUANG Y X, ZHANG Y Z, et al. Design and implementation of water rocket dynamic monitoring system based on wireless data transmission [J]. Physics Bulletin, 2022(5): 134 – 135, 139. (in Chinese)
- [19] AGRAWAL A, GAFFORD A, ELLIOT R. Apparatus and method for testing liquid propelled rocket; US11226247B2[P]. 2022 – 01 – 18.
- [20] JIANG Y Y, TANG W Y. Numerical study of section geometry of flexible bag of air cushion vehicle subjected to slamming loads [J]. Ocean Engineering, 2021, 227: 108894.
- [21] CHUNG J, JUNG T C. Optimization of an air cushion vehicle bag and finger skirt using genetic algorithms[J]. Aerospace Science and Technology, 2004, 8(3): 219 – 229.
- [22] STANNARD D, QUINN D, HILL C, et al. Experimental investigation of self-pressurized propellant injection into a simulated rocket motor combustion chamber[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2021, 142: 103707.
- [23] CHEN L, YANG F L, WANG Y Q. Analysis of nonlinear aerodynamic performance and passive deformation of a flexible flapping wing in hover flight [J]. Journal of Fluids and Structures, 2022, 108: 103458.
- [24] MARKO E. Flexible display structures for user equipment; WO2020EP62234[P]. 2021 – 11 – 11.