

# 液体火箭发动机关机水击特性仿真

周晨初, 李舒欣, 陈宏玉, 王 丹, 任孝文

(西安航天动力研究所 液体火箭发动机技术重点实验室, 陕西 西安 710100)

**摘 要:** 关机水击是引起液体火箭发动机及其试验台故障的常见现象之一。为获得关机水击的主要影响规律, 采用一维有限体积法建立了发动机关机水击仿真模型, 通过地面试验验证了模型的正确性。针对发动机常见设计变量, 开展仿真研究, 结果表明: 水击增量与推进剂流量、流速成正比; 管路足够长时, 水击增量与其长度无关, 但管路过短时, 管路越短, 水击增量越小; 局部流阻靠近贮箱有利于降低水击, 加快收敛; 阀门作动时间小于半个水击周期时, 水击增量等于完全水击值, 否则, 阀门作动时间越长, 水击值越小; 推进剂内注入少量气体, 能明显抑制关机水击。

**关键词:** 液体火箭发动机; 关机水击; 一维有限元; 数值仿真

中图分类号: V430 文献标识码: A 文章编号: 1672-9374(2021)01-0070-06

## Simulation on water hammer during liquid rocket engine shutdown

ZHOU Chenchu, LI Shuxin, CHEN Hongyu, WANG Dan, REN Xiaowen

(Science and Technology on Liquid Rocket Engine Laboratory, Xi'an Aerospace  
Propulsion Institute, Xi'an 710100, China)

**Abstract:** Water hammer during shutdown is one of the common phenomena that cause liquid rocket engine or its test bed to fail. To study the characteristics of water hammer during liquid rocket engine shutdown, simulation models were built based on one-dimensional finite element and the correctness of these models were verified by ground test. On this basis, the influences of common design variables were studied by simulation. The results show that the increment of water hammer is proportional to the flow rate and velocity of propellant. When the pipe is long enough the increment of water hammer is independent of its length, otherwise the shorter the pipe is, the smaller the increment is. The closer the local flow resistance is to the tank, the more favorable it is to reduce water hammer increment and accelerate its convergence. When the valve movement time is less than half of the water hammer cycle, the water hammer increment is equal to complete water hammer value, otherwise the shorter the valve movement time is, the smaller the water hammer will be. The water hammer will be obviously inhibited, while a small amount of gas is injected into the propellant.

**Keywords:** liquid rocket engine; water hammer; one-dimensional finite element; numerical simulation

收稿日期: 2020-09-08; 修回日期: 2020-10-21

基金项目: 国家级重点实验室基金项目(6142704180308)

作者简介: 周晨初(1991—), 男, 硕士, 研究领域为液体火箭发动机系统动力学仿真。

## 0 引言

液体火箭发动机在工作过程中,由于液体局部加速度过大引起管路中压强急剧变化形成水击<sup>[1]</sup>。水击所产生的压强通常可以达到管道稳态压强的几倍到几十倍不等,经常造成发动机及其试验台系统结构破坏。火箭发动机推进剂供应管路是一个复杂的管网系统,尤其近年来随着发动机高度集成和快速响应的发展,其关机水击问题更加突出<sup>[2]</sup>。

Menabrea 最早开展水击理论研究,指出管道具有弹性和水流可以压缩,计算水击时应考虑波速的影响<sup>[3]</sup>。李文勋建立了瞬变流的基本微分方程,奠定了水击分析的理论基础<sup>[4]</sup>。WYLIE E B 等人探讨了水击连续性方程能够在恒定流条件下恒成立的问题,猜测可能由于没有考虑摩擦阻力或管道倾斜对水流状态的影响<sup>[5]</sup>。侯咏梅对水击连续性方程不满足恒流条件的问题做了初步探讨,考虑管道的摩擦阻力与倾斜度的影响,并对基本方程进行了重新推导<sup>[6]</sup>。水击问题可由一维瞬变流动基本方程描述,它们是一组非线性双曲型偏微分方程,一般情况下不存在解析解,只能采用数值计算方法求解<sup>[7-8]</sup>。随着计算机技术的发展,国内外学者采用数值仿真的方法,对水击问题进行了大量研究,其中包括:特征线法<sup>[5,9-13]</sup>、有限元法<sup>[9-12]</sup>、无网格法<sup>[13-15]</sup>和谱方法等<sup>[8,16-18]</sup>。由于发动机管网复杂,采用特征线法在时间步长协调上比较困难,边界条件的处理也比较复杂,而且非线性迭代解算收敛较慢,限制了特征线法在复杂系统(如补燃循环发动机)动态特性分析方面的应用<sup>[12]</sup>。谱方法的最大优点是“无穷阶收敛性”,对于方程的解充分光滑情况下,所求得的近似解将以基函数个数的任意次幂速度收敛于精确解<sup>[18]</sup>,但水击仿真过程中由于存在参数间断或大梯度变化时,采用谱方法容易造成 Gibbs 振荡现象。一维有限体积法将计算域沿流体流动方向划分为若干不重复但可重叠的控制体(状态单元和速度单元),认为控制体内物理量不变,将描述连续介质流体力学守恒方程应用于每个控制体,可得到流体的一维方程<sup>[13]</sup>。该方法物理意义明确,物理量的守恒性好,处理复杂边界连接的问题方便,在流体力学数值模拟中得到了广泛应用。本文主要基于一维有限体积法开展发动机水击特性

研究。

## 1 仿真模型

发动机阀门关闭时,由于流体惯性,贮箱到阀门之间的推进剂会继续向阀前流动,并逐渐滞止,当所有推进剂完全滞止时,流体处于最大压缩状态,管壁处于最大拉伸状态,阀前压强达到最大;下一时刻,由于阀前压强远大于贮箱压强,推进剂压力波回传,假设液体和管壁完全是弹性的,不考虑能量损耗,当管壁恢复到正常状态,阀前压强恢复到平衡态;当管壁进一步压缩,将会在阀前形成低压区,压力波反射回贮箱入口时,管壁处于最大压缩状态,阀前压强达到最小;此时由于管壁处于最大压缩状态,管内液体处于舒张状态,当管壁状态恢复后,液体压力恢复,形成一个完整水击周期。发动机水击压强、频率与管网组成和阀门关闭时间有关。采用一维有限体积法建立管路、阀门的一维有限体积模型,对发动机关机水击进行仿真分析。

### 1.1 管道模型

由于水击频率一般较高,为精确捕捉水击频率和峰值特征,需要采用分布参数描述管道水击过程。从描述黏性不可压缩流体的 N-S 方程出发,采用一维有限体积法,沿管路轴线方向进行离散,离散方法如图 1 所示。忽略热传导、重力场和管壁弹性变形的影响,得到等直径管可压缩流一维瞬变流动的连续性方程、动量守恒方程和能量守恒方程。

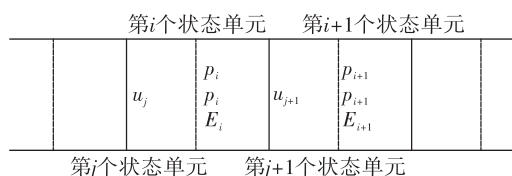


图1 一维有限体积法交错网格划分

Fig. 1 Grid division of one-dimensional finite element

$$\frac{d\rho_i}{dt} = \frac{1}{l_i}(\rho_{i-1}u_i - \rho_i u_{i+1}) \quad (1)$$

$$\frac{dE_i}{dt} = \frac{1}{l_i}((E_{i-1} + p_{i-1})u_i - (E_i + p_i)u_{i+1}) \quad (2)$$

式中: $\rho$  为介质密度; $u$  为介质流速; $p$  为介质压力; $E$  为单位体积介质总能; $l$  为分段管长; $i=0,1,\dots,n-1$  为管道轴线方向状态控制单元编号,认为状态控制

单元内流体压强、温度等状态量保持不变;需要指出的是式中未考虑局部流阻影响。

$$\frac{dW_j}{dt} = [\rho_{j-1}u_{j-1}^2 + p_{j-1}]A - [\rho_j u_j^2 + p_j]A = f_j \frac{\rho_{j-1}V_{j-1} + \rho_j V_j}{2} \quad (3)$$

式中: $A$  为管路截面积; $W$  为流体动量; $f$  为单位质量介质受到管壁摩擦阻力; $j=0,1,\dots,n$  为管道轴线方向速度控制单元编号,且速度控制单元与状态控制单元交替存在,认为速度控制单元内流体速度保持不变。

为使方程封闭,需要补充控制体比能量计算方程

$$E_i = \rho_i e_i + \frac{1}{2} \rho_i \left( \frac{u_i + u_{i+1}}{2} \right)^2$$

流体状态方程

$$P = P(\rho, e)$$

式中  $e$  为介质比内能。

采用真实流体的立方型状态方程<sup>[19-20]</sup>,能够较为准确地模拟纯物质液相及气相的压力、内能及密度之间的关系。流体动量计算方程

$$u_j = \frac{2W_j}{\rho_{j-1}V_{j-1} + \rho_j V_j}$$

式中  $V$  为控制单元体积。

作用在管壁上的摩擦阻力系数计算公式

$$f_j = \frac{f_{\lambda j} u_j |u_j|}{2D_j}$$

式中  $f_{\lambda}$  为无量纲摩擦损失系数; $D$  为管路直径。

## 1.2 阀门模型

由于阀门进出口容腔长径比较小,按流容单元处理,认为单元内流体状态混合均一,阀芯节流按喷孔模型处理,得到阀门一维有限元模型。

进口容腔模型

$$\begin{cases} \frac{d\rho_1}{dt} = \frac{1}{V_1}(\rho_{in}u_{in}A_{in} - Q_m) \\ \frac{dE_1}{dt} = \frac{1}{V_1} \left[ (E_{in} + p_{in})u_{in}A_{in} - (E_1 + p_1) \frac{Q_m}{\rho_1} \right] \end{cases} \quad (4)$$

出口容腔模型

$$\begin{cases} \frac{d\rho_2}{dt} = \frac{1}{V_2}(Q_m - \rho_{out}u_{out}A_{out}) \\ \frac{dE_2}{dt} = \frac{1}{V_2} \left[ (E_1 + p_1) \frac{Q_m}{\rho_1} - (E_2 + p_2)u_{out}A_{out} \right] \end{cases} \quad (5)$$

节流孔模型

$$Q_m = C_d A(t) \sqrt{2\rho(p_1 - p_2)} \quad (6)$$

考虑到阀门动作时间对关机水击压强冲击影响较大,补充阀芯开度方程  $A = A(t)$ 。

## 2 水击特性仿真分析

### 2.1 模型验证

利用现有常规推进剂液体火箭发动机试验台系统对上述管道、阀门模型水击仿真准确性进行验证。试验台系统由贮箱、供应路截止阀、管路、推力室和供应系统主阀组成,压力测点位于氧化剂和燃料主阀前,如图 2 所示。其中氧化剂管路长 13 m;燃料供应管路长 20.8 m;管路直径均为 32 mm;阀门动作时间 12 ms。

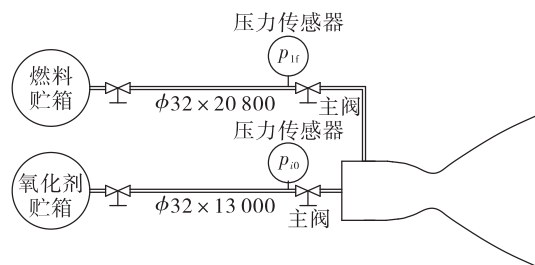


图 2 试验台系统组成

Fig. 2 Diagram of test system

试验台系统关机水击仿真与试验对比如图 3 和图 4 所示。图 3 和图 4 中,阀门关闭时产生第一个水击压力峰,水击压力峰维持到压力波传播到贮箱出口为止,压力峰值衰减主要是由于压力波振荡过程中节流圈、管道等元件能量耗散造成的。氧化剂和燃料水击仿真幅值和振荡频率与试验数据吻合较好,验证了仿真模型的正确性。

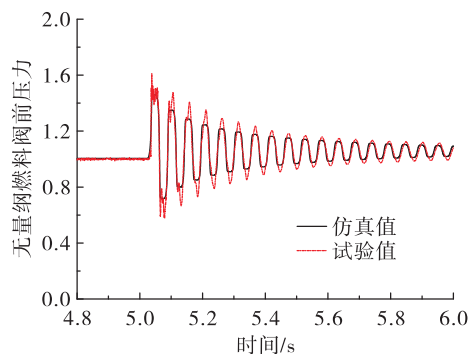


图 3 燃料路阀前水击

Fig. 3 Pre-valve pressure of fuel supply line

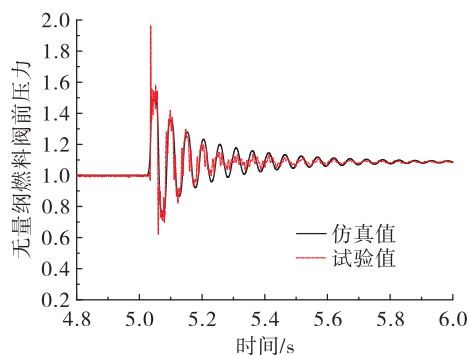


图4 氧化剂路阀前水击

Fig. 4 Pre-valve pressure of oxidant supply line

## 2.2 关机水击影响因素分析

为获得发动机关机水击的主要影响因素及其规律,以燃料供应管路为研究对象,针对推进剂流量、节流元件位置、流量、管路长度、阀门动作时间、推进剂含气率等设计变量进行仿真分析,无量纲仿真结果如图5~图9所示。

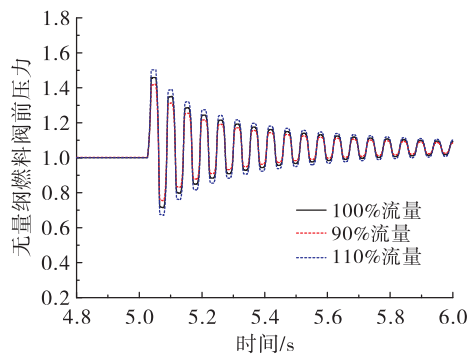


图5 推进剂流量的影响

Fig. 5 Influence of propellant flow rate

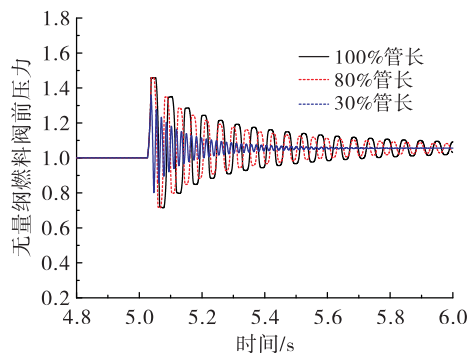


图6 管路长度影响

Fig. 6 Influence of pipe length

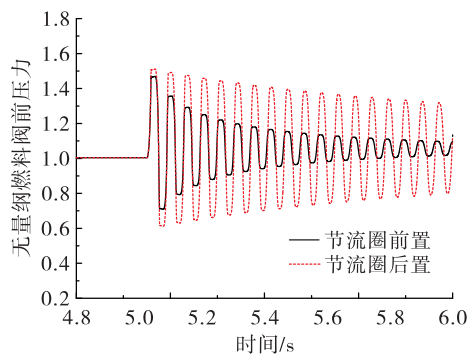


图7 节流元件位置的影响

Fig. 7 Influence of restrictor position

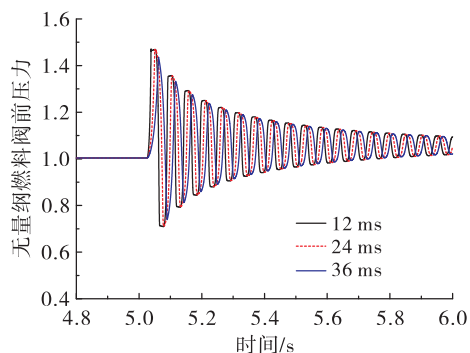


图8 阀门关闭时间影响

Fig. 8 Influence of valve actuation time

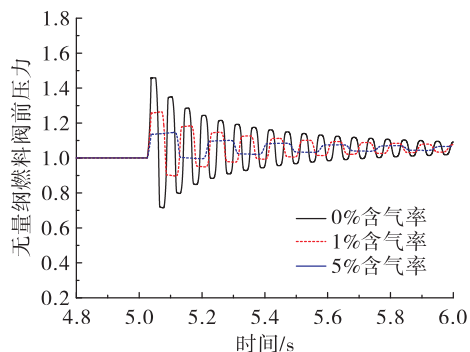


图9 推进剂含气率影响

Fig. 9 Influence of gas rate in propellant

流量分别为设计工况的90%、100%、110%时,燃料阀前水击压强如图5所示。各工况下水击增量峰值分别为2.88、3.175和3.481 MPa。相比于设计工况,90%流量和110%流量下,燃料路水击压力分别增加了-9.29%和9.64%。水击增量与流量成正比,水击频率和收敛特性与流量无关。因此,在发动机设计过程中,为避免关机水击过大,可采

取低工况关机的措施,以降低关机风险。

由于发动机设计过程中,流量一般由推力决定,改变流量意味着需要调整发动机工况,难度较大。由流量公式  $Q_m = \rho u A$  可知,密度不变时,流量与流速和流通面积相关。由此,可知水击增量可能与流速或管路截面积相关。为进一步研究流速、管路直径对水击的影响,保持流量不变,流量分别为设计工况的 90%、100%、110% 时,燃料阀前水击压强如图 5 所示。各工况下水击增量峰值分别为 2.888、3.175、3.509 MPa。相比于设计工况,90% 流速和 110% 流速下,燃料路水击压力分别增加了 -9.04% 和 10.52%。水击增量与流速成正比,水击频率和收敛特性与流速无关。因此,当发动机工况不变时,可通过改变流速,有效降低发动机关机水击压强。

为研究管路长度对发动机关机水击的影响,保持其他变量不变,管路长度分别为设计管长的 100%、80%、30% 时仿真结果如图 7 所示。各工况下水击增量峰值分别为 3.175、3.175、2.469 MPa。相比于设计工况,80% 管长和 30% 管长下,燃料路水击压力分别增加了 0% 和 10.52%。造成这种现象的原因是当管路长度足够长,水击压强有足够的发展时间时,水击增量峰值等于最大水击压力;当管路相对较短,导致水击周期小于两倍的阀门动作时间时,水击压强来不及发展到峰值,已经受到阀门打开的影响开始下降,其峰值小于最大水击压力。此外,管路长度变短时,水击频率增大。

为研究局部流阻位置对发动机关机水击的影响,保持其他变量不变,分别将节流圈置于贮箱出口和燃料阀前,关机水击仿真结果如图 7 所示。节流圈调整到阀前时,关机水击振荡频率保持不变,压强峰值增大了 2.5%,振荡收敛速度变慢,说明局部流阻元件位于贮箱出口有利于抑制关机水击。

为研究阀门动作时间对发动机关机水击的影响,保持其他变量不变,阀门关闭动作时间 12、24、36 ms 时,关机水击仿真结果如图 8 所示。图中可以看出,水击周期为 53.2 ms,当阀门动作时间小于半个水击周期时,水击为完全水击,水击压强峰值保持不变;当阀门动作时间大于半个水击周期时,水击表现为间接水击,水击压强峰值低于完全水击压强。同时可以看出,阀门动作时间不影响水击周

期,但阀门动作越慢,水击振荡相位越滞后。

为研究含气率对发动机关机水击的影响,保持其他变量不变,推进剂含气率(体积分数)分别为 0%、1% 和 5% 时的仿真结果如图 9 所示。各工况下水击增量峰值分别为 3.175、1.818、1.001 MPa。相比于设计工况,1% 含气率和 5% 含气率时,燃料路水击压强分别增加了 -42.7% 和 -68.5%。由液体中吹入气体形成均质气液两相物质的声速<sup>[8]</sup>  $a^2 = \left\{ [\alpha \rho_g + (1 - \alpha) \rho_l] \left[ \frac{\alpha}{\rho_g a_g^2} + \frac{1 - \alpha}{\rho_l a_l^2} \right] \right\}^{-1}$ ,可知:推进剂中注入一定量气体,介质弹性模量减小、可压缩性增强,从而起到降低水击压强、减小水击频率的效果。需要注意的是推进剂中注气可能带来热防护与燃烧不稳定风险,采取该措施抑制水击时,应评估其带来的其他发动机可靠性风险。

### 3 结论

采用一维有限体积法建立了液体火箭发动机试验台系统关机水击仿真模型,仿真与试验对比验证了仿真模型的正确性。在此基础上,针对工程上常用的水击抑制手段进行仿真分析,主要结论如下:

1) 减小系统流量可以降低阀前关机水击压强,水击频率和收敛性保持不变,发动机设计过程中可采取降工况关机的措施,抑制水击。

2) 当发动机工况、流量无法调整时,可通过增大管路直径、降低推进剂流速的方法抑制关机水击,且该方法操作简单,在工程上较为可行。

3) 改变管路长度,对水击频率有一定影响,当管路足够长时水击压强峰值保持不变,说明供应管路长度与水击压强峰值不直接相关,但当管路长度小于一定值,导致水击周期小于两倍的阀门动作时间时,关机水击来不及充分发展,管路越短,水击峰值越小。

4) 局部流阻元件位于贮箱出口,水击峰值较低,频率不变,收敛较快,是抑制关机水击的简便措施之一。

5) 当阀门动作时间小于半个水击周期时,水击峰值保持不变,大于半个水击周期时,水击表现为间接水击,水击峰值低于完全水击压强。在条件允许情况下,应使阀门动作时间大于半个水击周期。

6) 推进剂中注入一定量气体,可以改变混合介

质的弹性模量,降低介质声速,显著降低水击压强和频率。

#### 参考文献:

- [1] WYLIE E, STEERER V L. 瞬变流[M]. 清华大学流体传动与控制教研室,译. 北京: 水利电力出版社,1983.
- [2] 张峥岳,康乃全. 轨姿控液体火箭发动机水击仿真模拟[J]. 火箭推进,2012,38(3):12-16.
- ZHANG Z Y, KANG N Q. Simulation of water hammer in liquid rocket engine of orbit and attitude control system[J]. Journal of Rocket Propulsion,2012,38(3):12-16.
- [3] 董晨钟. 水击理论研究[D]. 郑州:郑州大学,2014.
- [4] 李文勋[美]. 水力学中的微分方程及其应用[M]. 韩祖恒,郑开琪,译. 上海:上海科学技术出版社,1982.
- [5] WYLIE E B, STREETER V L, SUO L S. Fluid Transients in Systems[M]. New Jersey: Prentice Hall Inc,1993.
- [6] 侯咏梅. 水击理论与计算研究[D]. 郑州:郑州大学,2003.
- [7] RUTH E, AHN H, BAKER R, et al. Advanced liquid rocket engine transient model[C]//26th Joint Propulsion Conference. Orlando, Reston, Virginia: AIAA, 1990.
- [8] 陈宏玉,刘红军,刘上. 水击问题的 Fourier 谱方法计算[J]. 火箭推进,2012,38(3):7-11.
- CHEN H Y, LIU H J, LIU S. Spectral-Fourier method for water hammer[J]. Journal of Rocket Propulsion,2012,38(3):7-11.
- [9] SASSNICK H D, KRUELLE G. Numerical simulation of transients in feed systems for cryogenic rocket engines[C]//31st Joint Propulsion Conference and Exhibit. San Diego, CA, USA, Reston, Virginia: AIAA,1995.
- [10] 王珏. YF-73 氢氧发动机起动过程分析[D]. 北京:航天工业总公司第十一研究所,1990.
- [11] 林景松,王平阳,高红,等. 液体火箭发动机关机水击的数值模拟[J]. 上海航天,2008,25(3):53-57.
- [12] 张育林,刘昆,程谋森. 液体火箭发动机动力学理论与应用[M]. 北京:科学出版社,2005.
- [13] 刘昆,张育林. 一维可压缩流的有限元状态空间模型[J]. 推进技术,1999,20(5):62-66.
- [14] KOLCIO K, HELMICKI A J, JAWEED S. Propulsion system modeling for condition monitoring and control: part I theoretical foundation [R]. AIAA 1994-3227,1994.
- [15] KOLCIO K, HELMICKI A J, JAWEED S. Propulsion system modeling for condition monitoring and control: part II application to the SSME [R]. AIAA 1994-3228,1994.
- [16] TIJSSELIING A S, BERGANT A. Meshless computation of water hammer[C]// Proceedings of 2nd IAHR International Meeting of the Workgroup on Cavitation and Dynamic Problems in Hydraulic Machinery and Systems. Timisoara, Romania: IAHR,2007.
- [17] 陈宏玉,刘红军,陈建华,等. Chebyshev 超谱粘性法在推进剂供应管路非定常流动分析中的应用[J]. 推进技术,2012,33(5):804-808.
- [18] GUO B Y. Spectral methods and their applications[M]. Singapore: World Scientific,1998.
- [19] LI P F, LEI F P, ZHOU L X, et al. Investigation of real-fluid characteristics in high-pressure liquid rocket engines [C]// 67th International Astronautical Congress (IAC). Guadalajara, Mexico: IAC,2016.
- [20] 任孝文,陈宏玉,李平,等. 弱可压缩流体与可压缩流体模型的管路水击研究[J]. 推进技术,2020,41(8):1880-1886.