预存气体闭端管路的充填水击研究 *

任孝文[1]，李　平[2]，陈宏玉[1]，周晨初[1]，唐　亮[1]

（1. 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；
2. 航天推进技术研究院，陕西 西安 710100）

摘　要：为提升补燃循环发动机仿真平台的分布参数计算能力，针对常温液体充填预存气体闭端管路的水击现象，使用Modelica语言基于MWorks平台建立了一维有限体积的管路充填模型，并分别使用该模型和集中参数模型对现有文献中的充填水击实验进行了仿真模拟。结果表明：对于预存气体0.1MPa的工况下，一维有限体积模型与集中参数模型对实验的模拟度均较为接近；而在管路接近真空的工况下，一维有限体积模型的计算结果与实验数据吻合度很高，集中参数模型误差则高达76%左右。在不同预存气体压力下的计算结果表明：在管路刚度一定、预存气体压力在0.1MPa以下时，气体的压缩缓冲作用是充填过程中水击压力峰值得以减弱的主要原因；当预存气体压力在0.1MPa以上时，气体的缓冲作用与充填流量的减小共同导致了充填水击压力峰值的减弱。对不同弹性管路的计算表明：在闭端管路的充填过程中，管壁弹性对近真空管路的影响相对较大，对预存气体压力较大的管路几乎没有影响。

关键词：预存气体；闭端管路；充填；水击；压力震荡；参数模型

中图分类号：V421.42　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1001-4055（2020）12-2700-09

DOI：10.13675/j.cnki. tjjs. 190722

Investigation on Water Hammer During Filling Process of Closed Conduit with Entrapped Air

REN Xiao-wen[1]，LI Ping[2]，CHEN Hong-yu[1]，ZHOU Chen-chu[1]，TANG Liang[1]

（1. Science and Technology on Liquid Rocket Engine Laboratory，Xi'an Aerospace Propulsion Institute，Xi'an 710100，China；
2. Academy of Aerospace Propulsion Technology，Xi'an 710100，China）

Abstract：To improve the capability of distributed parameter modeling of a staged combustion cycle engine simulation platform，a one-dimensional finite volume model was developed to simulate the water hammer of the normal temperature fluid during the filling process of closed conduit with entrapped air. In the present work，the model was programmed by Modelica on MWorks platform，and utilized to simulate several experiments in literatures with comparison of lumped method. The results show that both one-dimensional finite volume model and lumped model have a good agreement with experimental data in the case of 0.1MPa pressure gas in the closed conduit，but in vacuum case one-dimensional finite volume model simulates experiments more accurately while the error of lumped model reaches to about 76%. Under the condition of the given pipeline stiffness，the results for different pre-pressurized pipelines indicate that the cushion effect of gas plays a major role in reducing the water hammer pressure during the filling process when the pressure of entrapped air is less than 0.1MPa. With the ex-

* **收稿日期**：2019-10-17；**修订日期**：2019-11-19。

基金项目：液体火箭发动机技术重点实验室开放基金（6142704180308）。

通讯作者：任孝文，博士生，研究领域为液体火箭发动机系统动力学。E-mail：renxiaowenchina@163.com

引用格式：任孝文，李　平，陈宏玉，等. 预存气体闭端管路的充填水击研究[J]. 推进技术，2020，41(12)：2700-2708.（REN Xiao-wen，LI Ping，CHEN Hong-yu，et al. Investigation on Water Hammer During Filling Process of Closed Conduit with Entrapped Air[J]. *Journal of Propulsion Technology*，2020，41(12)：2700-2708.）

ception of cushion effect of gas, the decrease of mass flow rate starts to weaken the peak pressure when the pressure of entrapped air is more than 0.1MPa. The simulations for different elastic pipes indicate that the elasticity has a relatively large impact on water hammer in vacuum case while nearly no impact in higher pressure cases.

Key words: Entrapped air; Closed conduit; Filling; Water hammer; Pressure oscillation; Parameter model

1 引　言

在航天推进系统的起动过程中，通常需要对闭端管路或者末端阀门关闭的管路进行快速充填，特别对于真空度较高的管路，当推进剂液柱充填至关闭状态的阀门时会产生剧烈的压力激增和震荡，该现象也称充填水击。充填水击压力严重时会达到20MPa以上，因此在推进系统设计时，必须考虑该压力峰值的影响，否则将会导致管路结构破裂引发安全事故[1]。为安全起见，工程上除了提升管路强度外，为减弱充填水击的压力峰值，还会在管路上增加节流元件[2]或者在管路内预存一定量的不溶性气体。提升管路强度常常通过增加管壁厚度来实现，但这会增加推进系统的重量，节流元件的存在又会导致供应系统不必要的压力损失，而预存不溶性气体则对这两方面的影响较小。因此，针对预存气体管路进行充填水击的研究是十分必要的，可以为相关工程应用提供一定的参考。

国内外有很多学者对贮箱-管路系统进行过水击特性的研究，Ghidaoui等[3]曾发表过一篇关于水击理论与实验的综述，其中对历史上的水击研究有一个较为系统的梳理，但是其总结的研究大多与关阀水击[4]有关，对充填水击[5]的讨论较少。针对预存气体闭端管路的充填水击，国内陈宏玉等[6-7]分别基于特征线法及Fourier谱方法，利用坐标变换将管路内随时间变化的液体求解区域变换为求解较方便的固定区域，较好地处理了气液交界面的移动问题；秦艳平等[8]同样利用了坐标变换法，但是在数值离散方面使用了有限差分WENO格式；Bandyopadhyay等[9]使用NASA马歇尔空间飞行中心开发的基于有限体积方法的通用流体系统仿真程序GFSSP(Generalized fluid system simulation package)[10]对Lee[11]的充填水击实验进行了仿真模拟；上述学者使用的充填模型均只能对液体区域进行分布参数计算，预存气体部分仍使用了集中参数的方法。刘昆等[12]使用一维有限元状态变量模型对常温推进剂充填闭端管路进行了仿真研究，其中充填单元的压力计算采用了等效流容方法；程谋森等[13]使用特征线有限差分方法，对液体与气体计算区域分别采取不同的空间网格，以实现气液控制方程在时间上的同步性和稳定性；Bombardieri等[14]利用德宇航Lampoldshausen的实验设备以水为工质进行了闭端管路的充填水击实验，并使用推进系统仿真软件ESPSS(European space propulsion system simulation)[15]对实验进行了仿真模拟；以上三种模型均能够对液体和气体进行分布参数计算。实验方面，除了上述学者进行的充填水击实验外，Traudt等[16]研究了弯管在有支撑与无支撑情况下的充填水击，实验中首次测得了泊松耦合并分析该耦合可能是导致第二个水击压力峰值大于第一个水击压力峰值的原因；Hatcher等[17]实验研究了管路长径比等几何结构、预存气体体积以及充填速率对水击压力的影响；Lecourt等[18]则使用乙醇、甲基肼等真实推进剂进行了简单管路的充填实验。

鉴于特征线法对有分支的、含气液两相的管路系统适应性较差，高精度的有限差分法如WENO格式等对边界的处理较为复杂，同时为了能够与我国补燃循环发动机仿真平台[19]目前已有的贮箱、阀门等组件进行匹配使用，本文采用一维有限体积法，在模块化建模的思路上，使用非因果建模的Modelica语言[20]基于MWorks仿真平台建立了预存气体闭端管路的充填模型，并与文献中的实验结果以及补燃循环发动机仿真平台已有的集中参数模型进行了对比。该充填模型扩充了我国补燃循环发动机仿真流体库，提升了该平台对充填过程的气液分布参数计算能力。

2 数学模型

本文所研究的流体均为常温流体，易相变的低温流体不在考虑范围之内，同时不考虑流体与壁面的传热。假设充填过程中液体与气体不相溶且两相之间具有明确的分界面，液体为弱可压缩流体[21]，密度为定值，气体为可压缩流体；且在任一瞬间，管流的压强、密度、温度和速度在任一截面上是均一的且只随管长方向变化，管路横截面积为定值，忽略流体重力的影响。采用一维有限体积方法，使用图1所示的状态网格单元与速度网格单元交错的方式将管路

进行等分，图中管道两端半个状态网格内流体的速度取实际上下游边界的速度，分别用下标a和b表示。每个网格单元分为三种状态：未充填、充填以及充满，每个状态均有各自的控制方程。

未充填状态，网格单元内充满预存气体，单元内流动过程由气体控制方程描述为

$$\frac{\mathrm{d}\rho_i^{\mathrm{g}}}{\mathrm{d}t}=\frac{1}{\Delta l}\left(\rho_i^{\mathrm{g-in}}\cdot u_{i-1}-\rho_i^{\mathrm{g-out}}\cdot u_i\right) \tag{1}$$

$$\frac{\mathrm{d}p_i}{\mathrm{d}t}=\frac{\gamma}{\Delta l}\left(p_i^{\mathrm{in}}\cdot u_{i-1}-p_i^{\mathrm{out}}\cdot u_i\right) \tag{2}$$

$$\frac{\mathrm{d}u_i}{\mathrm{d}t}=\frac{1}{0.5\cdot\Delta l\cdot\left(\rho_i^{\mathrm{g}}+\rho_{i+1}^{\mathrm{g}}\right)}\left(p_i-p_{i+1}\right)-\frac{f\cdot u_i\cdot\left|u_i\right|}{2D} \tag{3}$$

式中ρ_i^{g}为网格单元内的气体密度，$\rho_i^{\mathrm{g-in}}$，$\rho_i^{\mathrm{g-out}}$分别为状态网格单元入口边界的气体密度与出口边界的气体密度；p_i为状态网格单元的压力，p_i^{in}，p_i^{out}分别为状态网格单元入口边界的压力与出口边界的压力；u_i为流体速度，Δl为网格长度，γ为气体的比热比，f表示达西摩擦系数，D为管路内径；下标i为网格索引。

充填状态，气液交界面位于网格单元内，因此需要对该涉及两相流的网格单元进行特殊处理。采用刘昆等[12]的等效流容方法，并假设单元内气体变化过程为等熵过程，则充填过程的控制方程如下

$$\frac{\mathrm{d}p_i}{\mathrm{d}t}=\frac{1}{C_i}\left(u_{i-1}-u_i\right) \tag{4}$$

式中C_i即为等效流容。

$$C_i=\frac{l_i^{\mathrm{p}}}{\rho_1\cdot a^2}+\frac{l_i^{\mathrm{g}}}{\gamma\cdot p_i}$$

式中l_i^{p}为网格单元内液相充填长度，l_i^{g}为网格单元内气相长度，ρ_1为液体密度，由于弱可压缩流体的假设，液体密度为定值，对于水取ρ_1=1000kg/m^3。a为液体声速，考虑流固耦合[22]时，液体声速为

$$a=\frac{a_1}{\sqrt{1+c\dfrac{\rho_1\cdot a_1{}^2\cdot D}{E\delta}}} \tag{5}$$

式中a_1为不考虑流固耦合时的液体声速，对于水a_1=1.2×10^{3}m/s，E为管壁弹性模量，δ为管壁厚度；c为考虑管路支撑影响的修正量，具体取值为

$$c=\begin{cases}1-\dfrac{\mu}{2} & \text{One end of the pipe fixed}\\ 1-\mu^2 & \text{Full pipe fixed without axial movement}\\ 1 & \text{Elastic support}\end{cases} \tag{6}$$

式中μ为泊松比，通常取0.3。不同于刘昆等[12]的模型，对于充填网格单元内预存气体的密度变化，本文使用气体等熵方程$\dfrac{p_i}{\left(\rho_i^{\mathrm{g}}\right)^{\gamma}}=\mathrm{Const}$的时间导数形式，即

$$\frac{\mathrm{d}\rho_i^{\mathrm{g}}}{\mathrm{d}t}=\frac{\rho_i^{\mathrm{g}}}{\gamma\cdot p_i}\cdot\frac{\mathrm{d}p_i}{\mathrm{d}t} \tag{7}$$

当前充填网格两边的流速与网格充填过程有关，对于气体部分，有

$$\frac{\mathrm{d}u_i}{\mathrm{d}t}=\frac{1}{\rho_i^{\mathrm{g}}\cdot l_i^{\mathrm{g}}+0.5\rho_{i+1}^{\mathrm{g}}\cdot\Delta l}\cdot\left(p_i-p_{i+1}\right)-\frac{f\cdot u_i\cdot\left|u_i\right|}{2D} \tag{8}$$

对于液体部分，有

$$\frac{\mathrm{d}u_{i-1}}{\mathrm{d}t}=\frac{1}{\rho_1\cdot l_i^{\mathrm{p}}+0.5\rho_1\cdot\Delta l}\cdot\left(p_{i-1}-p_i\right)-\frac{f\cdot u_{i-1}\cdot\left|u_{i-1}\right|}{2D} \tag{9}$$

充满状态，网格单元内为纯液相流动，该过程可用弱可压缩流体模型的控制方程来描述，具体可参见文献[21]。

充填过程是一个复杂的非稳态过程，模拟该过程需要对未充填、充填以及充满这三种状态进行准确的切换。鉴于本文研究的管路为等截面管路，使用液相充填长度l_i^{p}来进行气液界面的移动判别，即

$$\frac{\mathrm{d}l_i^{\mathrm{p}}}{\mathrm{d}t}=\begin{cases}0 & l_{i-1}^{\mathrm{p}}<\Delta l & \text{Present cell in unfilled state}\\ u_{i-1} & l_{i-1}^{\mathrm{p}}\geqslant\Delta l\cap 0\leqslant l_i^{\mathrm{p}}<\Delta l & \text{Present cell in filling state}\\ 0 & l_{i-1}^{\mathrm{p}}\geqslant\Delta l\cap l_i^{\mathrm{p}}\geqslant\Delta l & \text{Present cell in filled state}\end{cases} \tag{10}$$

为方便与补燃循环发动机仿真平台[19]的其他组件模块配合使用，该管路充填模型的入口及出口使用速度边界，即入口速度由上游组件模块给定，出口速度由下游组件模块给定；相应地，第一个网格单元的气液界面判别由入口速度与液相充填长度共同决定，即

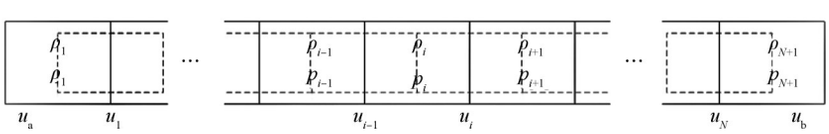


Fig. 1 Staggered grids of state cells (solid lines) and flow cells (dashed lines)

$$\frac{\mathrm{d}l_1^{\mathrm{p}}}{\mathrm{d}t}=\begin{cases}0 & u_{\mathrm{a}}\leqslant 0 & \text{First cell in unfilled state}\\ u_{\mathrm{a}} & u_{\mathrm{a}}>0\cap 0\leqslant l_1^{\mathrm{p}}<\Delta l & \text{First cell in filling state}\\ 0 & u_{\mathrm{a}}>0\cap l_1^{\mathrm{p}}\geqslant\Delta l & \text{First cell in filled state}\end{cases}\tag{11}$$

初始时刻，每个网格的液相充填长度 l_i^{p} 设定为一个小量，压力为预存气体压力，气体密度为对应压力下的密度值，速度为0。

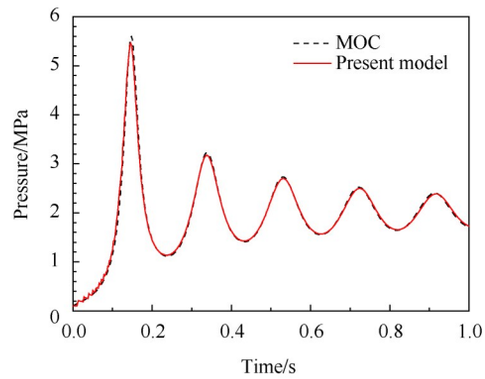
3　计算及分析

利用本文建立的预存气体管路的一维有限体积充填模型，在用特征线法验证该模型的基础上，分别以Lee[11]和Bombardieri等[14]的充填水击实验为例，搭建了闭端管路的充填水击仿真系统以确认本文模型的有效性，并与补燃循环发动机仿真平台已有的集中参数模型进行了对比。同时为进一步探索影响充填特性的因素，分别进行了不同预存气体压力以及不同弹性管路的充填水击计算。

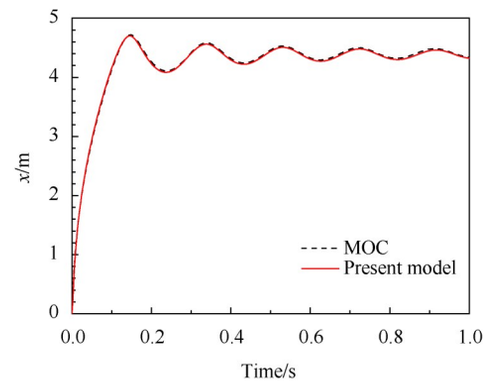
3.1　与特征线法的对比

特征线法将偏微分形式的质量与动量方程沿特征线合并为常微分形式的特征方程，并通过沿特征线积分将其转化为代数方程进行流场计算，这一过程无需进行复杂的迭代计算，结果具有解析解的精度，被很多学者称为半解析计算方法[23-24]。因此，除了与实验数据进行比较外，大多数计算水击问题的数值方法均通过与特征线法进行对比来验证模型的准确度[9,25-26]。针对贮箱、隔离阀、充填管路组成的简单系统，图2给出了本文建立的一维有限体积模型与特征线法的对比，计算中流体介质为水，贮箱压力为2MPa，充填管路内径为0.01m，预存气体压力为0.1MPa，并假设隔离阀瞬时打开。

图2表明，本文方法（Present model）计算得到的气液界面位置和管路末端压力均与特征线方法（MOC）的计算结果吻合度较高，验证了一维有限体积模型的有效性。特征线法虽然具有较高的精度，但是其对时间步长的选取要求较高；特别地，在应用特征线法计算复杂管路系统的瞬态流动时，由于库朗特数（Courant number）<1的要求，时间步长受限于最小网格尺寸和流体声速：管网中各个组件网格划分可能不尽相同，同时对于不同材料的管路组成的管路系统，由于流固耦合作用的影响，不同管路中流动的声速也产生差别，这就导致了最后选取的时间步长将会相当小。此外，若复杂管路系统中存在预存气体管路的充填过程，那么由于气液界面位置的存在，必然涉及气液两相的方程切换，而由于气液声速的较大差异，在划分网格与时间步长的选取方面



(a) Pressure of downstream end



(b) Position oscillation of liquid-gas interface

Fig. 2　Comparison between present model and method of characteristics (MOC)

以及气液移动界面位置的数值插值方面将需要进行复杂的处理，而同时计算的稳定性也较差。

本文建立的一维有限体积模型，在时间离散方面采用时间步长自适应的DASSL算法[26]，网格可根据需要对不同组件进行不同尺寸的分割，与特征线法相比，在保证计算准确性的前提下，提高了计算的稳定性和速度，且更适合于模块化建模。

3.2　与Lee的实验对比

图3为Lee[11]的实验系统示意图，实验中液体工质选用水。初始时刻，管路预先充液长度 L_{l}=6.096m，预存气体长度 L_{g}=4.947m，气体与液体之间由处于闭合状态的球阀隔开（图中 CD 位置），气体压力 p_{g} 为一个大气压。$L_{\mathrm{T}}=L_{\mathrm{l}}+L_{\mathrm{g}}$ 为管路总长，L 为液体充填长度，管路内径 D=26mm，贮箱压力 p_{T} 恒定为0.7MPa。0.15s时刻球阀开启，至0.4s球阀开度达到最大。

基于补燃循环发动机仿真平台，按照图3实验系统搭建了闭端管路充填水击的仿真模型，分别使用一维有限体积的充填模型和该平台现有的集中参数

充填模型进行模拟，其中一维有限体积模型将管路等分为100个网格。预先充液部分均使用一维有限体积的弱可压缩流体管路模型[21]，网格数量为50。球阀的开阀曲线与实验中设置相同。由于文献未给出实验过程使用的管路材料、管壁厚度以及管路支撑方式，因此仿真过程假设管路为刚性，不考虑流固耦合的影响。

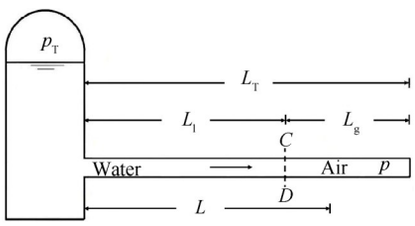


Fig. 3 Schematic of the water pipe with entrapped air

图4给出了计算得到的预存气体管路末端的水击压力，除了与实验数据进行对比外，还与Bandyopadhyay等[9]针对该实验得到的GFSSP仿真结果进行了比较。从图中可以看到，液体在充填过程中，预存气体受到了压缩，管路末端产生了明显的压力激增；当气体压力很大时，液体开始向贮箱方向回流，液体的惯性作用又使得气体过度膨胀造成管路末端压力急剧减小，此时液体又开始向管路末端正流，并再次压缩气体；这一过程的循环往复造成了管路内的水击震荡，而由于管路壁面的摩擦作用，压力震荡逐渐衰减。图4中的三种数值模型均能反映管路末端这一水击压力震荡过程，水击压力峰值与实验数据均具有较高的吻合度；但是在水击震荡频率方面，本文建立的一维有限体积管路充填模型与GFSSP模型的

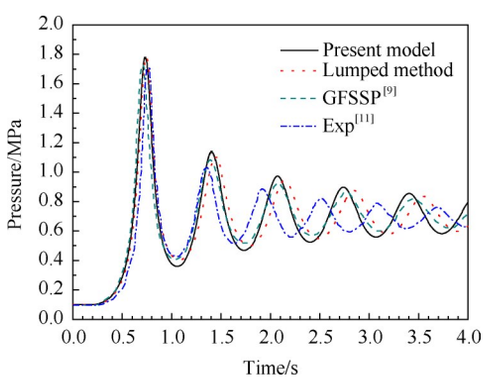


Fig. 4 Comparison among the present model, other models and experiment data

模拟度较高，而集中参数模型较差。

3.3 与Bombardieri的实验对比

Bombardieri的实验系统详见文献[14]，液体工质同样使用水，开阀作动时间为6ms，流阻系数为12.5。本文选取贮箱压力为2MPa，充填段预存气体分别为0.1MPa及2kPa（近真空）的实验工况进行仿真。该实验的系统仿真模型与3.2节相同，其中预先充液管路网格划分为200，各组件参数与实验参数设置相同，球阀改为气动阀门且在0.7s时刻打开。管路材料使用06Cr18Ni11Ti不锈钢，其弹性模量 E = 193GPa，管壁厚度 δ = 1.25mm，由于文献未给出管路支撑方式，因此仿真过程假设为一般支撑（μ = 1）。

如图5、图6所示，使用一维有限体积两相充填模型计算得到的管路末端压力结果除了与实验数据进行对比外，还与集中参数模型以及文献[14]中ESPSS分布参数模型的计算结果进行了比较。图5中，预存气体0.1MPa的工况下，一维有限体积的管路充填模型与集中参数模型计算得到的压力峰值与实验数据较为接近，而ESPSS计算结果偏大；水击震荡频率方面，ESPSS计算结果与实验吻合度较高，集中参数模型模拟度最差，本文建立的模型介于两者之间。

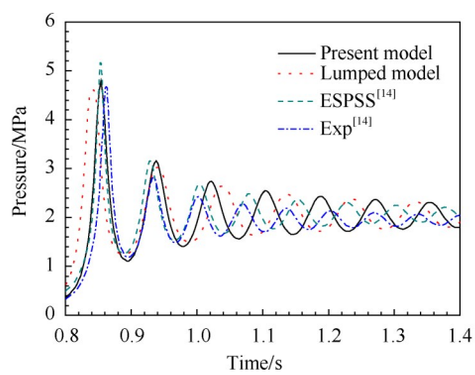
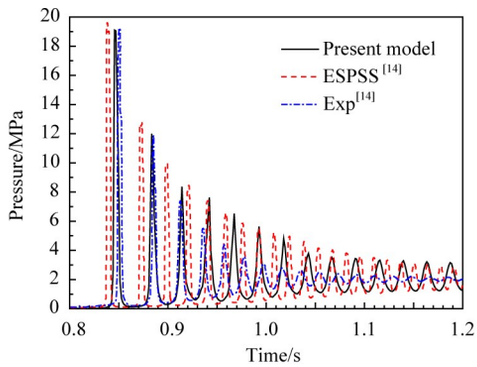


Fig. 5 Pressure of the downstream end in ambient case (0.1MPa pressure gas in the test-element)

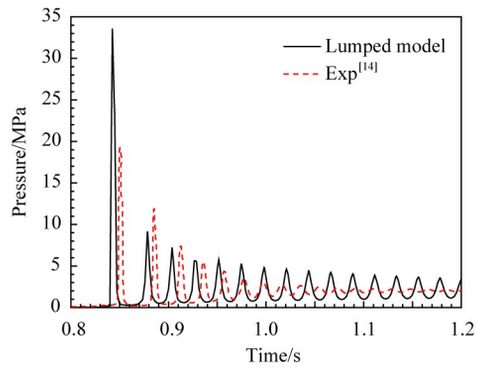
为了方便比较，在预存气体压力2kPa，即管路内接近真空的工况下，图6分别给出了三种数值模型与实验数据的对比。与图5相比，充填过程产生的水击压力峰值是预存气体压力0.1MPa时的4倍左右，水击震荡频率也大幅上升。由此可见，在管路内预存一定量的气体能够大大降低充填过程的水击压力峰值，特别对于末端封闭或者末端阀门关闭的管路，预存气体能够起到保护管道结构的缓冲作用。

图6中，一维有限体积充填模型与ESPSS模型计算得到的水击压力峰值与实验测得的压力峰值吻合度较高，而集中参数模型计算得到的压力峰值高出实验值76%左右，这是因为不同于弱可压缩流体模型将可压缩性集中反映在声速上，集中参数模型假设液体为刚性，即流体的声速为无穷大，而实际上当

预存气体减少时，液体的弹性开始变得重要。从水击震荡频率的角度比较，ESPSS计算得到的频率为55Hz左右，比实验测得的频率42.5Hz偏高大约30%，本文建立的一维有限体积充填模型计算得到的震荡频率为35Hz，比实验值低17.6%，误差略小于ESPSS模型。从以上分析可以看到，在水击压力震荡幅值及频率方面，一维有限体积模型计算得到的结果与实验数据的吻合度最高。关于数值结果与实验数据之间差别的原因见下一小节。



(a) Comparison among present model results, ESPSS results and experimental data



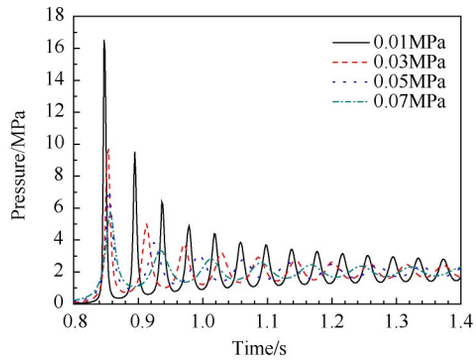
(b) Comparison between lumped method results and experimental data

Fig. 6　Pressure of downstream end in vacuum case (2kPa pressure gas in the test-element)

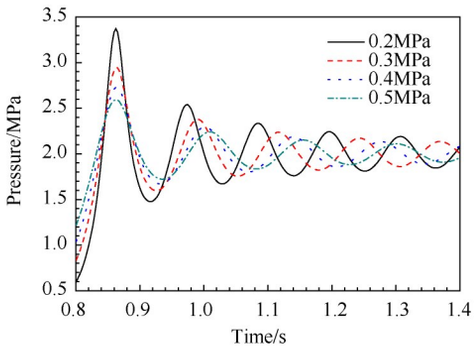
3.4　预存气体压力对充填水击特性的影响

由上述实验验证可知，本文建立的一维有限体积管路充填模型能够较好地模拟预存气体闭端管路的充填水击特性，为进一步探索预存气体压力对充填特性的影响，在贮箱压力保持2MPa恒定的条件下，依然采用文献[14]的实验条件设置仿真模型参数，分别对0.01MPa，0.03MPa，0.05MPa，0.07MPa的预存气体管路进行充填计算，管路末端压力结果如图7所示。

将图7结合图5及图6进行比较，可以看到随着预存气体压力的逐渐增大，充填水击压力峰值逐渐减小，震荡频率也逐渐减弱。一方面是由于预存气体的气垫保护作用逐渐明显，另一方面随着预存气体压力的增大，在贮箱压力恒定的条件下，液体充填流量有一定的减弱，如图8所示。



(a) 0.01~0.07MPa pressure gas in the pipe



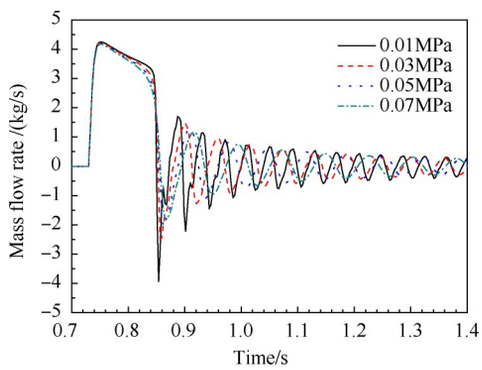
(a) 0.2~0.5MPa pressure gas in the pipe

Fig. 7　Pressure of downstream end of pipe

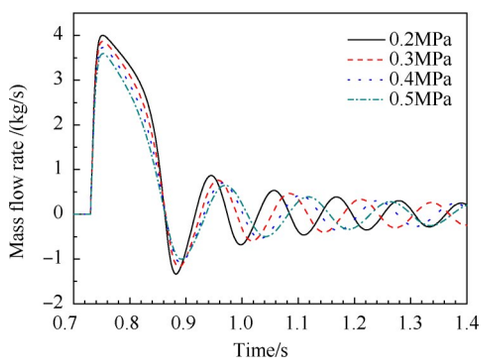
对图8(a)进一步分析，在贮箱压力恒定不变的条件下，当预存气体压力<0.1MPa时，管路充填流量随预存气体压力变化较小，而图7(a)中管路末端压力峰值与振荡频率却随预存气体压力的增大而明显减弱。因此，当预存气体压力<0.1MPa时，气体的压缩缓冲作用是充填水击压力峰值得到缓解的主要原因。在图8(b)中，当预存气体压力>0.2MPa时，管路充填流量随预存气体压力的增大而减小。因此，在该条件下，气体的缓冲作用与充填流量的减小共同造成了充填水击压力峰值的减弱。

从3.2，3.3小节中与Lee[11]以及Bombardieri等[14]的实验对比可以看到：本文数值方法得到的计算结果中均只有第一个压力峰值与实验数据接近，之后的压力峰值及频率与实验吻合度不高，这与Zhou等[27]和Lee等[28]的研究结果相似。这是由于数学模型的气液不相溶假设造成的，实际实验中进入水击震荡周期后将会出现部分气体与水形成气水混合物的现象，造成实际存气量的减小，根据本小节的分析可以知道，在预存气体管路的充填过程中，气体的压

缩性对水击有主导作用，气体量的减小将会造成缓冲作用的减弱，进而导致实验测得的振荡频率与计算值相比偏大。另一方面实验中由于气体量的减小，震荡周期中形成的部分气水混合物可能直接与管路末端关闭状态的阀门碰撞，此时混合物的压缩性开始变得重要；但是气液两相混合物的声速可远小于每一组成相单独存在时的声速[29]，根据茹科夫斯基最大水击压强公式 $p_{max}=\rho ua$，混合物与阀门碰撞产生的压力将减小，这或许可以解释为何实验数据在除第一个压力峰值外其余峰值较数值计算小的现象；此外实验中测量仪器如压力探针等的存在也会导致实际流动过程产生过多的压力损失。总而言之，震荡过程中形成的气液混合物是数值计算与实验数据无法完全吻合的关键原因，该方面需要后续进行大量的实验及仿真工作来进行深入研究。



(a) 0.01~0.07MPa pressure gas in the pipe



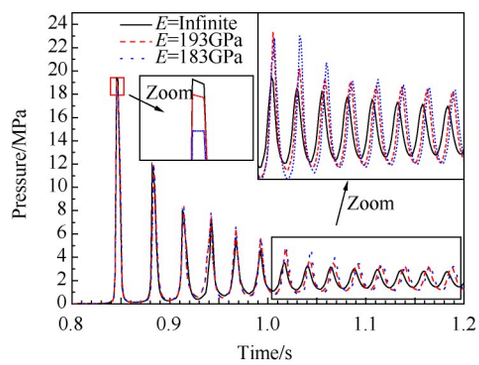
(b) 0.2~0.5MPa pressure gas in the pipe

Fig. 8 Mass flow rate of filling

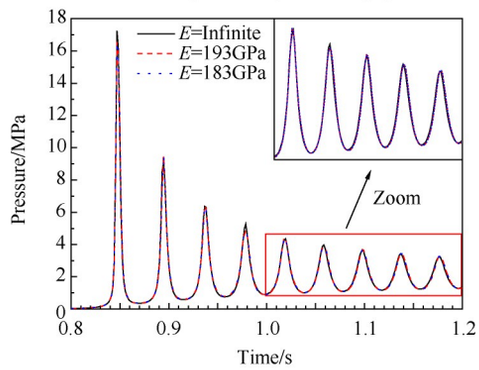
3.5 管路弹性对预存气体闭端管路充填水击特性的影响

为进一步探索流固耦合对闭端管路充填特性的影响，在贮箱压力保持2MPa恒定、管壁厚度1.25mm的条件下，依然采用文献[14]的实验参数设置仿真模型参数，分别对一般支撑形式(μ=1)的不同弹性模量的管路进行了仿真模拟，结果如图9所示。

由图9可见，在预存气体闭端管路的充填过程中，刚性管路与弹性管路计算得到的末端压力随时间的变化基本一致。存在较大差别的是充填近真空管路(预存气体2kPa)的工况，如前所述，在近真空管路的充填过程中，液体的压缩性开始占据主要作用：从图9(a))中可以看到，随着管路弹性模量的减小，第一个水击压力峰值逐渐减小，震荡频率也呈略微减小的趋势，这是由于考虑流固耦合之后，管路流体的声速变小，刚性管路声速最大，为1200m/s。管壁弹性模量 E=193GPa 时，声速为 1144.76m/s；E=183GPa时，声速为1141.5m/s。同时，由于振荡频率的减小，相同时间内管路的沿程损失减小，进而导致压力的衰减也放缓，表现在压力衰减阶段弹性模量较低的管路压力幅值较高。同时从图中可以预测，在预存气体压力0.01MPa以上时，管路末端压力主要由气体的压缩性决定，因此管路弹性的改变对水击压力几乎没有影响。



(a) 2kPa pressure gas in the pipe



(b) 0.01MPa pressure gas in the pipe

Fig. 9 Comparison among different modulus of elasticity

4 结 论

通过本文研究，得出如下结论：

(1)预存气体压力为0.1MPa的工况下，一维有限体积的管路充填模型与集中参数模型计算得到的压力峰值与实验数据较为接近；水击震荡频率方面，相

对于集中参数模型，一维有限体积模型对实验的模拟度较高。在管路内接近真空的工况下，一维有限体积模型计算得到的结果与实验数据的吻合度最高。

(2)在管路刚度一定的条件下，当预存气体压力≤0.1MPa时，气体的压缩缓冲作用是充填水击压力峰值得到缓解的主要原因；当预存气体压力>0.1MPa时，气体的缓冲作用与充填流量的减小共同导致了充填水击压力峰值的减弱。

(3)在管路内接近真空的工况下，增大管壁的弹性能够略微减小充填过程的最大水击压力峰值和振荡频率；但是当预存气体压力>0.01MPa时，充填过程的水击压力主要由气体的压缩性决定，因此管路弹性的改变对水击压力几乎没有影响。

(4)针对常温流体充填闭端管路的物理过程，与特征线法以及高精度有限差分法相比，本文建立的一维有限体积模型使用DASSL算法进行常微分方程组的求解，在保证数值模拟准确性的前提下，提高了计算的稳定性和速度，且更有利于快速地模块化建模。

(5)根据假设，该模型仅适用于常温流体以及气液不相溶的充填过程，其中气液不相溶的简化是导致计算结果中只有第一个压力峰值与实验吻合的原因。因此气液混合物的模拟以及低温流体相变充填的过程将是下一阶段的重点工作。

致　谢：本文工作在液体火箭发动机技术重点实验室开放基金的支持下开展，特此感谢。

参考文献

[1] 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.

[2] Kelly R. The Use of a Flow Limiter in Propellant Feedlines During a Priming Event[R]. *AIAA* 2018-4759.

[3] Ghidaoui M S, Zhao M, McInnis D A, et al. A Review of Water Hammer Theory and Practice[J]. *Applied Mechanics Reviews*, 2005, 58(1): 49-76.

[4] Adamkowski A, Lewandowski M. Experimental Examination of Unsteady Friction Models for Transient Pipe Flow Simulation [J]. *Journal of Fluid Engineering*, 2001, 128(6).

[5] Jeffrey D Moore, Grant A Risha. Numerical Modeling of Priming Event Peak Pressures in Liquid Propulsion Systems[R]. *AIAA* 2019-4123.

[6] 陈宏玉，刘红军，陈建华，等. 基于谱方法的管路充填过程仿真[J]. 航空动力学报，2012，27(9)：2134-2139.

[7] 陈宏玉，刘红军，刘　上. 推进剂管路充填过程的数值模拟[J]. 航空动力学报，2013，28(3)：561-566.

[8] 秦艳平，梁俊龙，李　斌，等. 基于有限差分WENO格式的推进剂供应管路充填特性研究[J]. 推进技术，2016，37(9)：1759-1765.（QIN Yan-ping, LIANG Jun-long, LI Bin, et al. Priming Behaviors in Propellant Feedline Analysis Based on High Order Finite Different WENO Scheme[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2016, 37(9): 1759-1765.）

[9] Bandyopadhyay A, Majumdar A. Network Flow Simulation of Fluid Transients in Rocket Propulsion Systems[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2014, 30(6): 1646-1653.

[10] LeClair A, Majumdar A. Computational Model of the Chilldown and Propellant Loading of the Space Shuttle External Tank[C]. *Nashville: 46th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit*, 2010.

[11] Lee N H. Effect of Pressurization and Expulsion of Entrapped Air in Pipelines[D]. *Atlanta: Georgia Institute of Technology*, 2005.

[12] 刘　昆，张育林. 液体推进系统充填过程的有限元状态变量模型[J]. 推进技术，2001，22(1)：19-21.（LIU Kun, ZHANG Yu-lin. Finite Element State-Variable Models for the Priming Process of Feed Lines[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2001, 22(1): 19-21.）

[13] 程谋森，张育林. 推进剂供应管路充填过程研究[J]. 推进技术，1997，18(2)：70-74.（CHENG Mou-sen, ZHANG Yu-lin. An Analysis on Prepressurized and Evacuated Feedline Priming Process[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 1997, 18(2): 70-74.）

[14] Bombardieri C, Traudt T, Manfletti C. Experimental and Numerical Analysis of Water Hammer During the Filling Process of Pipelines[C]. *Cologne: Space Propulsion Conference*, 2014.

[15] De Rosa M, Steelant J, Moral J, et al. ESPSS: European Space Propulsion System Simulation[C] *Heraklion: International Symposium on Propulsion for Space Transportation*, 2008.

[16] Traudt T, Bombardieri C, Manfletti C, et al. Influences on Water-Hammer Wave Shape: an Experimental Study [J]. *Ceas Space Journal*, 2016, 8(3): 215-227.

[17] Hatcher T M, Vasconcelos J G. Peak Pressure Surges and Pressure Damping Following Sudden Air Pocket Compression[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2017, 143(4): 1-11.

[18] Lecourt R, Steelant J. Experimental Investigation of Water Hammer in Simplified Feed Lines of Satellite Propulsion Systems [J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2007, 23(6): 1214-1224.

[19] 陈宏玉，刘红军，陈建华. 补燃循环发动机强迫起动

过程[J]. 航空动力学报，2015，30(12)：3010-3016.

[20] 赵建军，丁建完，周凡利，等. Modelica语言及其多领域统一建模与仿真机理[J]. 系统仿真学报，2006，18(2)：570-573.

[21] Chaudhry M H. Applied Hydraulic Transients [M]. *New York: Springer Science & Business Media*, 2013.

[22] 张凯宏，江 欣，肖明杰，等. 基于流固耦合理论的关机水击特性[J]. 火箭推进，2019，45(2)：36-43.

[23] Wylie E B, Streeter V L, Suo L. Fluid Transients in Systems[M]. *Englewood Cliffs: Prentice Hall*, 1993.

[24] Moody F J. Introduction to Unsteady Thermofluid Mechanics[M]. *New York: Wiley-Interscience*, 1990.

[25] Majumdar A K, Flachbart R H. Numerical Modeling of Fluid Transients by a Finite Volume Procedure for Rocket Propulsion Systems [C]. *Hawaii: 4th Joint Fluids Summer Engineering Conference*, 2003.

[26] Petzold L R. Description of DASSL: A Differential/Algebraic System Solver[C]. *Montreal: 10th IMACS World Congress on System Simulation and Scientific Computation*, 1981.

[27] Zhou L, Liu D, Ou C. Simulation of Flow Transients in a Water Filling Pipe Containing Entrapped Air Pocket with VOF Model [J]. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 2011, 5(1): 127-140.

[28] Lee N H, Martin C S. Experimental and Analytical Investigation of Entrapped Air in a Horizontal Pipe[C]. *San Francisco: 3rd ASME/JSME Joint Fluids Engineering Conference*, 1999.

[29] 汪洪波，吴海燕，谭建国. 推进系统动力学[M]. 北京：科学出版社，2018.

（编辑：史亚红）