

液氧管路燃气射流冷凝压力脉动传播特性研究

李翠¹, 武定航¹, 杜飞平², 李晨烁¹, 厉彦忠^{1,3}

(1. 西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安; 2. 西安航天动力研究所液体火箭发动机技术重点实验室, 710100, 西安; 3. 航天低温推进剂技术国家重点实验室, 100028, 北京)

摘要: 针对液氧/煤油补燃循环发动机液氧管路中,因发动机不稳定燃烧、系统结构振动、阀门启闭等原因产生压力脉动,从而影响推进剂流动及相间传热传质的问题,基于欧拉两流体模型构建了低温两相流动冷凝压力脉动传播数值模型,运用计算流体动力学(CFD)模拟研究了压力脉冲传播下气氧-液氧大温差掺混冷凝的两相流场瞬态分布特性及其松弛特性,分析了压力脉冲极性、幅值和持续时间对流场松弛时间、脉动传播速度和衰减率等传播特性的影响规律。模型预测结果与前人实验数据呈现良好的一致性。计算结果表明:相比于稳定冷凝状态,幅值为100 kPa、持续时间为0.1 s的正压力脉冲使气相冷凝长度缩短9.3%,相同参数的负压力脉冲则使其相对延长7%。正脉冲幅值的增加使得其平均传播波速增大、衰减率减小,负压力脉冲则相反;波速和衰减率与脉冲持续时间呈负相关性,随脉冲持续时间由0.01 s增长至1 s,正、负压力脉冲平均波速减小约65%,平均衰减率分别减小约51%和90%;松弛时间随脉冲幅值、持续时间的增加均增加,对脉冲极性的依赖性很小。该计算结果可为液氧/煤油补燃循环发动机推进系统动特性分析提供有效依据,为提升低温液体火箭安全性和稳定性提供一定的参考。

关键词: 低温液体火箭;两相流动冷凝;压力脉动;传播特性;计算流体动力学模拟

中图分类号: TB613 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202207014 **文章编号:** 0253-987X(2022)07-0127-09



OSID 码

Propagation Characteristics of Pressure Pulsation in Jet Condensing Flow of Liquid Oxygen Feed System

LI Cui¹, WU Dinghang¹, DU Feiping², LI Chenshuo¹, LI Yanzhong^{1,3}

(1. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

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

3. State Key Laboratory of Technologies in Space Cryogenic Propellants, Beijing 100028, China)

Abstract: Propagation of pressure fluctuation in propellant pipeline plays an important role in liquid rocket safety due to its effect on the flow and interphase heat and mass transfer. In the present study, a numerical model was developed based on the Eulerian two-fluid method to investigate the propagation characteristics of pressure pulsation in cryogenic two-phase flow condensation. CFD simulation was used to investigate transient distribution characteristics and relaxation characteristics of two-phase flow field under the conditions of large temperature difference between gaseous oxygen and liquid oxygen and their mixture condensation, and analyze the effects of the polarity, amplitude and duration of pressure pulse on such propagation characteristics of flow field as relaxation time, pulsation propagation speed and attenuation rate.

收稿日期: 2022-01-25。 作者简介: 李翠(1982—),女,博士,副教授。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52176021); 航天低温推进剂技术国家重点实验室开放研究课题资助项目(SKLTSCP202012)。

网络出版时间: 2022-03-30

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20220329.1116.002.html>

The results show that the condensation flow region expands by about 7% due to negative pressure pulses with an amplitude of 100 kPa and a duration of 0.1 s, but shortens by about 9.3% due to the positive ones. At the fixed flow conditions, the increase of the positive pulse amplitude leads to an increase in its propagation velocity and a decrease in the attenuation rate, while the negative pressure pulse exhibits an opposite characteristic. As the duration of the pressure pulse increases from 0.01 s to 1 s, the average velocity decreases by about 65% for both the positive and negative pressure pulses, while the attenuation rate decreases by about 51% for the positive pressure pulse and 90% for the negative one, respectively. The relaxation time shows little dependence on the polarity of pressure pulse, but increases with the increases of pulse amplitude and duration. The calculation results can provide an effective basis for the analysis of the dynamic characteristics of the cryogenic rocket engine propulsion system, which is of great significance for improving the safety and stability of cryogenic liquid rockets.

Keywords: liquid rocket; flow condensation; pressure fluctuation; propagation characteristic; numerical simulation

随人类深空探索逐步深入,液体火箭因其高比冲、大推力及无毒无污染等优点变得日益重要。推进系统作为液体火箭的动力来源,直接影响运载性能和飞行可靠性。由于发动机不稳定燃烧、系统结构振动、阀门启闭等原因,推进系统经常出现水击、间歇泉等非定常流动现象,从而产生可能数倍甚至数十倍于系统正常压力的瞬间压力振荡。压力振荡会在推进系统管路中传播,形成压力脉冲波,对整个系统的安全运行构成严重威胁。在以液氢、液氧等为燃料的低温液体火箭中,由于低温推进剂具有沸点低、表面张力小等特性,极易形成含气率随时间和空间不断发生变化、流型复杂的两相流动环境。特别在高压补燃循环系统的液氧管路中,高温富氧燃气喷射进入氧泵间管与过冷液氧掺混凝结,气液两相流过程十分复杂^[1]。因此,研究压力脉冲波在低温气液两相流中的传播特性及两相流场松弛特性,对低温液体火箭的安全运行有着重要意义。

压力波相关研究目前主要以常温和无相变工质为主,在低温两相流领域研究较少。Mallock^[2]、Wood等^[3]对压力波在两相流中传播进行了开创性研究,得到适用于低含气率的气液两相流方程。Karplus^[4]运用理论和实验研究方法,发现压力波在两相流中传播速度远低于单相流中。Ruggles等^[5-6]、Mahmood等^[7]证明了两相流中压力波波速与波频、含气率、气泡大小以及分布有关。李富林等^[8]在研究中指出气相流量的增加对压力波衰减的抑制有贡献。Huang等^[9]、Kuczynski等^[10-14]发现工作压力、壁面剪应力、虚拟质量力和阻力都对衰减系数有影响。对低温两相流动而言,其流型在相间

质量、能量交换作用下随时间、空间演变,相比单相流和常规气液两相流,压力脉冲波在其中的传播会更为复杂。杨晨声等^[15]通过氧气液氧实验,揭示了压力波传播会对掺混流型和冷凝长度产生影响。Chen等^[16-17]和李翠等^[18-19]利用两流体模型和小扰动理论,得到了压力波在低温气液两相流流动冷凝中的传播和衰减特性。上述低温领域压力波研究主要关注周期性扰动传播特性,对大过冷度冷凝流场的脉动响应特性和松弛特性研究较少。

本文运用Ansys中Fluent软件,基于欧拉两流体模型、两相流湍流模型、相间曳力模型和传热传质模型等,通过自定义程序(UDF)植入不同极性、幅值和脉冲持续时间的压力脉冲,研究压力脉冲传播下气氧-液氧掺混冷凝的两相参数时空演变规律与流场松弛特性,得到了压力脉冲传播速度、衰减率的参数影响规律,为液氧/煤油补燃循环发动机推进系统动特性分析提供有效依据。

1 压力脉动传播数值模拟

1.1 模型结构

本文以液体火箭发动机液氧泵间管路为研究对象,竖直圆管路长为1.05 m,直径为0.19 m,管路中心轴线处设置如图1所示13个监测点,在管路出口 h_0 端施加不同幅值和脉冲持续时间的正弦型压力脉冲波,监测各点处脉冲压力随时间变化规律。

其中过冷液氧温度为100 K,气氧温度为493 K,分别以9.5 m/s和20 m/s的速度自管路上端流入,入口截面含气率 $\alpha=0.5$,系统操作压力为1.26 MPa。在液体火箭推进系统管路中,由于其产生压

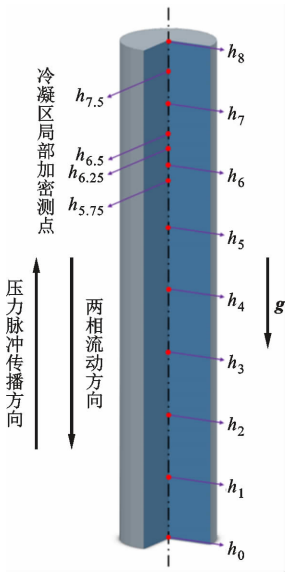


图 1 计算域物理模型

Fig. 1 Physical model of the computational domain

力振荡机制复杂多样,因此压力振荡持续时间难以确定,本文依据文献中低温管路脉冲流频率约为 0.1~10 Hz^[20],同时考虑到计算资源等因素,选取脉冲持续时间 t_0 为 0.01~1 s。详细数值模拟工况参数如表 1 所示。

表 1 数值模拟工况参数

Table 1 Operating parameters for numerical simulation

参数	数值
工作压力 p/MPa	1.26
液相、气相温度 T/K	100,493
入口含气率 α	0.5
入口液相、气相速度 $v/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	9.5,20.0
波形	正弦型脉冲压力波
脉冲压力波幅 A/kPa	10,20,50,100
	0.010,0.025,0.050,
脉冲持续时间 t_0/s	0.100,0.250,0.500,
	1.000

1.2 气液两相流守恒方程

采用欧拉两流体模型对气氧-液氧掺混冷凝两相流动进行数学描述。

(1)质量守恒方程为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha \rho_G) + \nabla \cdot (\alpha \rho_G \mathbf{v}_G) = \dot{m}_{LG} \tag{1}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}((1-\alpha)\rho_L) + \nabla \cdot ((1-\alpha)\rho_L \mathbf{v}_L) = -\dot{m}_{LG} \tag{2}$$

式中 $\dot{m}_{LG}$ 为 由液相转化为气相的质量。

(2)动量守恒方程为

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\alpha \rho_G \mathbf{v}_G) + \nabla \cdot (\alpha \rho_G \mathbf{v}_G \mathbf{v}_G) = \\ -\alpha \nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau}_G + \dot{m}_{LG} \mathbf{v}_{LG} + \alpha \rho_G \mathbf{g} + \\ \mathbf{F}_{dr,LG} + \mathbf{F}_{td,G} + \mathbf{F}_{wl,G} + \mathbf{F}_{ti,G} \end{aligned} \tag{3}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}((1-\alpha)\rho_L \mathbf{v}_L) + \nabla \cdot ((1-\alpha)\rho_L \mathbf{v}_L \mathbf{v}_L) = \\ -\alpha \nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau}_L - \dot{m}_{LG} \mathbf{v}_{LG} + \alpha \rho_L \mathbf{g} + \mathbf{F}_{dr,GL} + \\ \mathbf{F}_{td,L} + \mathbf{F}_{wl,L} + \mathbf{F}_{ti,L} \end{aligned} \tag{4}$$

式中: $\mathbf{F}_{dr}$ 为相间曳力, $\mathbf{F}_{td}$ 为湍流分散力, $\mathbf{F}_{wl}$ 为壁面润滑力, $\mathbf{F}_{ti}$ 为湍流相互作用力, 分别通过 Schiller-Naumann 模型^[21]、Lopez de Bertodano 模型^[22]、Antal 模型^[23] 和 Troshko Hassan 模型^[24] 计算得到; $\boldsymbol{\tau}$ 为应力应变张量, 表示为

$$\boldsymbol{\tau} = \alpha \mu (\nabla \mathbf{v} + (\nabla \mathbf{v})^T) + \alpha \left(\lambda - \frac{2}{3} \mu \right) \nabla \cdot \mathbf{v} \mathbf{I} \tag{5}$$

其中 μ 和 λ 分别为每相的剪切黏度和体积黏度。

(3)能量守恒方程为

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\alpha \rho_G H_G) + \nabla \cdot (\alpha \rho_G \mathbf{v}_G H_G) = \\ \alpha \frac{dp}{dt} + \boldsymbol{\tau}_G : \nabla \cdot \mathbf{v}_G + \dot{Q}_{LG} + \dot{m}_{LG} H_{LG} \end{aligned} \tag{6}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}((1-\alpha)\rho_L H_L) + \nabla \cdot ((1-\alpha)\rho_L \mathbf{v}_L H_L) = \\ (1-\alpha) \frac{dp}{dt} + \boldsymbol{\tau}_L : \nabla \cdot \mathbf{v}_L - \dot{Q}_{LG} - \dot{m}_{LG} H_{LG} \end{aligned} \tag{7}$$

式中: $\dot{Q}_{LG}$ 为相间换热强度; H_L 和 H_G 分别为液相比焓和气相比焓; H_{LG} 为相间焓。相间热交换率由 Two-resistance 模型确定, 该模型在相界面任意一侧采用不同的传热系数进行计算。

对于两相流湍流模型, 采用标准 $k-\epsilon$ 湍流模型来模拟湍流流动。

1.3 两相流蒸发冷凝模型

通过 Two-resistance 模型和热相变模型模拟气氧冷凝过程中相间传热与传质。液相和气相分别与相界面的热交换率表示为

$$Q_{Ls} = h_L A_i (T_s - T_L) - \dot{m}_{LG} H_{Ls} \tag{8}$$

$$Q_{Gs} = h_G A_i (T_s - T_G) - \dot{m}_{LG} H_{Gs} \tag{9}$$

$$A_i = \frac{6\alpha(1-\alpha)}{d_G} \tag{10}$$

式中: h_L 与 h_G 分别为液相侧传热系数和气相侧传热系数; T_s 为相界面温度, 假设相界面两侧温度相同且等于饱和温度; A_i 为相界面面积; d_G 为气泡直径; H_{Ls} 与 H_{Gs} 分别为液相焓和气相焓。

根据相间热平衡关系可得

$$Q_{Ls} + Q_{Gs} = 0 \tag{11}$$

则相间传质量可以确定为

$$\dot{m}_{LG} = - \frac{h_L A_i (T_S - T_L) + h_G A_i (T_S - T_G)}{H_{Gs} - H_{Ls}} \quad (12)$$

因此,相间传质量主要取决于相界面两侧的传热系数。液相侧与相界面间存在相对运动,进行强制对流换热,传热系数 h_L 采用 Hughmark 换热关系式计算;气相侧与相界面间无相对运动,近似为气相的导热过程,因此流传热系数 h_G 可忽略不计

$$Nu_G = \lim_{h_G \rightarrow 0} \frac{h_G d_G}{\kappa_G} = 0 \quad (13)$$

式中 κ_G 为气相的热导率。

1.4 压力脉冲传播模型

脉冲压力波通过用户自定义程序实现。当在管道出口处施加正弦型脉冲压力振动时,出口压力可以表示为

$$p_{out} = A \sin(2\pi ft) \quad (14)$$

$$t_0 = t_b - t_a \quad (15)$$

式中: t_a 、 t_b 分别为压力脉冲开始和结束时间。

压力波传播速度 c 根据互相关原理计算,通过计算 X、Y 两个位置处压力信号的相关性,可以得到随时间变化的函数

$$R_{XY}(t) = \lim_{T \rightarrow \infty} \int_0^T p_Y(t) p_X(t - \tau) dt \quad (16)$$

$R_{XY}(t)$ 的峰值对应的时间就是滞后时间,表示为

$$\tau = t(\max\{R_{XY}(t)\}) \quad (17)$$

压力波传播速度为

$$c = \frac{l}{\tau} \quad (18)$$

式中: l 为 X、Y 之间的距离。

压力波衰减率表达式如下

$$\delta = l^{-1} \ln \frac{A_Y}{A_X} \quad (19)$$

式中: δ 为压力波自位置 Y 传播至 X 处的衰减率; A_X 、 A_Y 分别为位置 X、Y 处脉冲压力波幅。

松弛时间 Δt_s 为脉冲经过后压力重新恢复至平衡状态所需的时间,可表示为

$$\Delta t_s = t_w - t_b \quad (20)$$

式中: t_w 为各测点($h_0 \sim h_8$)压力振幅皆降至脉冲初始幅值 A 的千分之一以下时对应的时刻。

依据所构建数值模型进行模拟计算,过程采用速度入口边界条件和压力出口边界条件,壁面采用无滑移边界条件。

2 模型验证

为验证本文数值模型的预测准确度,运用该模型对 Wang 等^[25]的竖直圆管内两相流压力波传递实验进行数值模拟验证。实验管路长为 6.61 m,直径为 0.01 m,水空气两相介质竖直向上流动,入口含气率 $\alpha = 0.04$,正弦型周期压力波频率为 9.64 Hz,幅值为 5 kPa。以管路入口截面为坐标原点($y=0$ m),压力测点 P_0 、 P_1 、 P_2 和 P_3 分别位于管路中心轴线 $y=0.5, 2.37, 4.24$ 和 6.11 m 处。图 2 给出了其传播过程中各测点压力波动情况的数值仿真结果与实验数据对比。其中各测点平均压力及波幅实验数据与数值仿真的偏差对比见表 2。

表 2 压力脉动传播过程各测点平均压力及波幅

Table 2 Average pressure and fluctuation amplitude during pressure wave propagation

测点	测点平均压力/kPa			平均压力的 相对偏差/%	测点压力波幅/kPa			压力波幅的 相对偏差/%
	实验值	计算值	绝对偏差		实验值	计算值	绝对偏差	
P_0	65.21	64.89	0.32	0.49	4.55	4.73	0.18	4.0
P_1	46.19	46.60	0.41	0.89	3.88	3.68	0.20	5.2
P_2	26.02	26.31	0.29	1.10	2.48	2.42	0.06	2.4
P_3	10.01	10.02	0.01	0.10	1.52	1.08	0.42	28.9

由表 2 可以看出,测点平均压力和压力波幅的相对偏差基本控制在 10% 以下,绝对偏差在 0~0.5 kPa 之间。另外可注意到, P_3 测点处波幅相对偏差较大,这是因为该实验装置管路顶端连接了一个敞口水槽,水槽中存留液体对两相循环流态及压力波传播过程具有一定影响,而在仿真计算模型中对该水槽进行了简化,从而产生一定偏差。另外,在实验

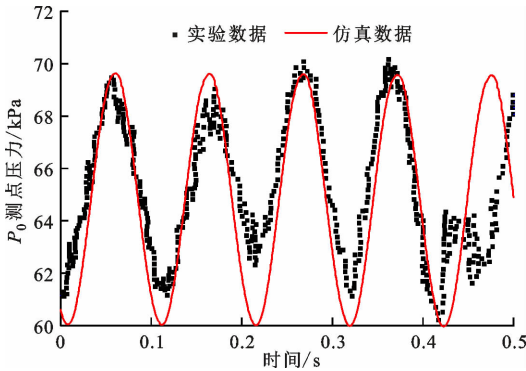
中由于随机界面压力波动,使所采集信号存在一定压力噪声^[25],结合计算误差考虑,对于整个管路压力场而言,0.42 kPa 的绝对偏差在允许的偏差范围内。综合其余各测点对比数据分析,认为数值模型计算结果与实验数据呈现良好的一致性,说明本文建立的数值模型能准确预测压力波在两相流中的传播特性。

3 计算结果及讨论

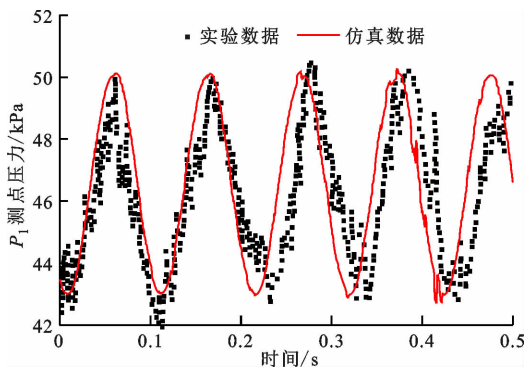
3.1 气氧冷凝特性

对表 1 工况进行模拟,无压力脉冲传播时管内气氧-液氧掺混冷凝状态如图 3(b)所示,随着气氧逐渐冷凝,沿流动方向截面含气率 α 逐渐减小,在距入口端(h_8)约 0.43 m 处降为 0,气氧被完全冷凝。

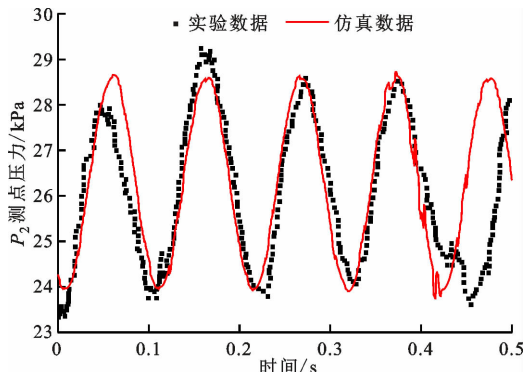
(1)单压力脉冲。幅值 $A=100$ kPa、持续时间 $t_0=0.1$ s 的正弦型正压力脉冲(如图 3(a)所示)自管路出口端(h_0)向上传播时,管内两相分布状态的瞬态变化如图 3(c)所示。在正压力脉冲作用下,气相区逐渐被压缩约 0.04 m,冷凝长度减小,即含气率 $\alpha=0$ 的截面位置上移至距入口端(h_8)约 0.39 m



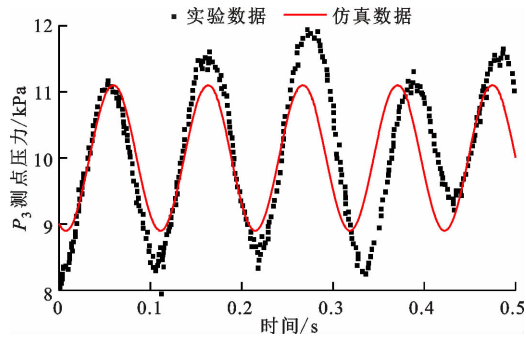
(a) P_0 测点



(b) P_1 测点



(c) P_2 测点

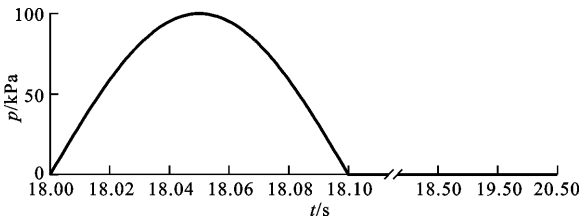


(d) P_3 测点

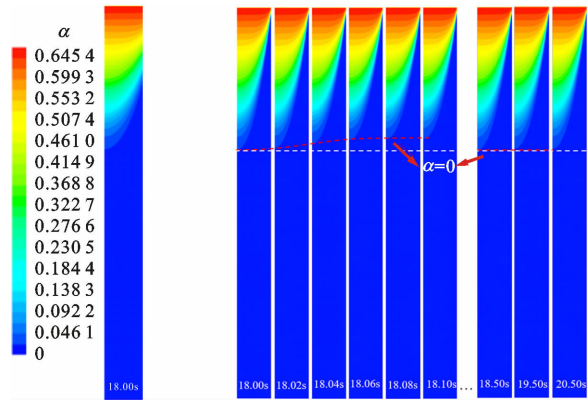
图 2 不同测点压力波动数值仿真与实验数据对比($\alpha=0.04, f=9.64$ Hz)

Fig. 2 Comparisons of the simulated pressure waves with experiments at different positions ($\alpha=0.04, f=9.64$ Hz)

处, $\alpha=0$ 的截面位置随时间变化如图 3 中红色虚线所示。在压力脉冲结束($t_b=18.10$ s)后,气相区逐渐恢复稳定,含气率 $\alpha=0$ 的截面逐渐下移至初始位置,管内各测点处压力幅值于 $t_w=20.29$ s 时均降至 100 Pa 以下,松弛至稳定状态。



(a) 正压力脉冲波形($A=100$ kPa, $t_0=0.1$ s)



(b)无压力脉冲相分布图 (c)压力脉冲开始传播后相分布图

图 3 压力脉冲传播对管内气氧冷凝分布影响

Fig. 3 Effect of pressure pulse propagation on oxygen flow condensation

根据管内各测点压力波动情况,得到其沿管路各测点传播速度、衰减率、压力波动值及管内含气率分布如图 4 所示。由图 4 可知,压力脉冲在气液两

相流中波速远低于在液相中,在气氧-液氧两相冷凝掺混区传播速度范围约为 $1.6 \sim 12$ m/s,而在单相液氧区传播速度则可达到约 200 m/s,这主要是因为压力波传播速度与两相混合介质可压缩性成反比^[19],在管路上半段两相冷凝区,含气率相对越大,可压缩性越大,波速越小;而下半段液氧单相区越靠近 h_0 端压力越大,可压缩性越小,波速越大。衰减率沿管路先增大后减小,这是由于随含气率增加,两相介质可压缩性不断增加,相间质量、动量和能量交换更加剧烈,从而更多地耗散为内能,在含气率 α 约为 0.5 时衰减率最大,可达到 30.8 dB/m。随含气率进一步增加,两相流态向气氧单相过渡,虽然可压缩性进一步提高,但是介质密度、黏度等逐渐减小,对压力脉冲耗散作用减弱,综合作用下导致衰减率减小。

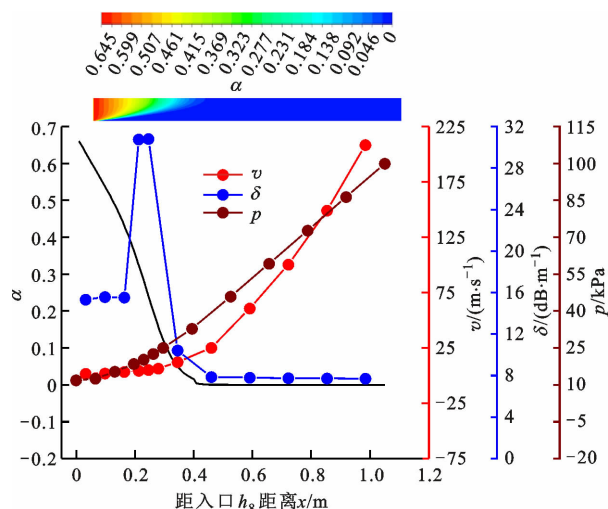


图4 压力脉冲沿管路传播速度与衰减率分布 ($A = 100$ kPa, $t_0 = 0.1$ s)

Fig. 4 Propagation speed and attenuation of pressure pulse versus position in the condensing flow ($A = 100$ kPa, $t_0 = 0.1$ s)

(2)连续压力脉冲。图5给出了5个连续正压力脉冲作用下各测点压力波动情况,本文选取连续脉冲所产生时间间隔为 0.1 s,小于该工况下单脉冲所需松弛时间 Δt_s 。脉冲压力波自 h_0 端传播至 h_8 端,幅值由 100 kPa 衰减为 11.856 kPa。由于脉冲间隔时间小于松弛时间,因此各相邻脉冲之间管内测点压力波动尚未恢复至稳定状态,导致管内压力波动叠加,使各测点处压力波动幅值呈阶梯上升趋势,进而对管路系统安全和工作稳定性构成威胁。

3.2 压力脉冲极性的影响

图6(a)所示的正弦型负压力脉冲传播时,管内

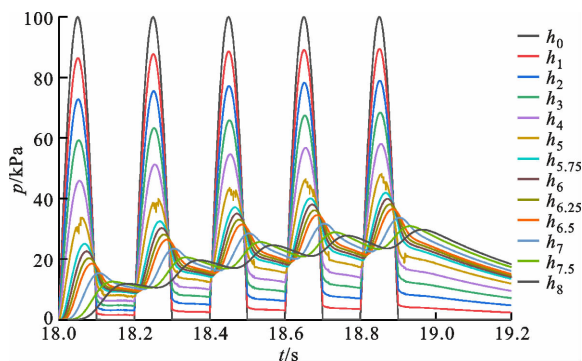
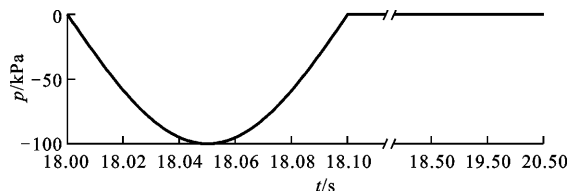
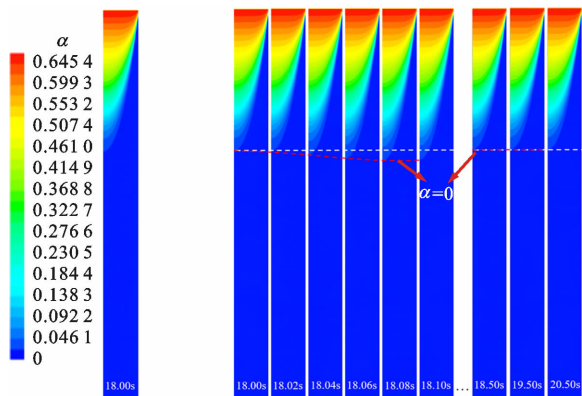


图5 连续正压力脉冲作用下管内各测点压力随时间变化
Fig. 5 Variation of pressure with time and position under continuous positive pressure pulse condition

气氧冷凝两相分布状态变化如图6(b)所示。由图3(c)与图6(c)可知,正压力脉冲使气液两相区被压缩,冷凝长度由稳定冷凝状态的 0.43 m 缩短至约 0.39 m,减小 9.3%;负压力脉冲使气液两相区膨胀,由 0.43 m 扩张至约 0.46 m,冷凝长度延长 7%,其完全冷凝截面随时间变化如图6(c)中红色虚线 $\alpha = 0$ 所示。正、负压力脉冲平均波速、衰减率及流场松弛时间如表3所示。



(a)负压力脉冲波形 ($A = 100$ kPa, $t_0 = 0.1$ s)



(b)无压力脉冲相分布图 (c)压力脉冲开始传播后相分布图
图6 负压力脉冲传播对管内气氧冷凝分布影响

Fig. 6 Effect of negative pressure pulse propagation on oxygen flow condensation

对比可得,相同流动状态下,正压力脉冲平均波速略高于负压力脉冲而衰减率则略小,这是由于压力脉冲改变了管内气氧冷凝区长度及工质可压缩性

表 3 正、负压力脉冲传播特性对比

Table 3 Comparison of propagation characteristics between positive and negative pressure pulses

脉冲压力	测点	波峰到达时间	波峰压力	脉冲持续时间	平均波速	平均衰减率	松弛时间
		t/s	p/kPa	t_0/s	$v/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$\delta/(\text{dB}\cdot\text{m}^{-1})$	$\Delta t_s/s$
正压力脉冲 100 kPa	h_0	18.050 0	99.928	0.1	7.93	2.030 1	2.186 1
	h_8	18.182 4	11.856				
负压力脉冲 -100 kPa	h_0	18.050 0	-99.927	0.1	7.55	2.041 9	2.183 4
	h_8	18.189 0	-11.711				

所导致。正压力脉冲使气氧冷凝区压缩变短,负压力脉冲则反之,而压力脉冲在气液两相流中波速远小于在气液单相中,衰减率的变化则相反。因此在相同管路中,气氧冷凝区相对越短,其平均波速就越大,衰减率越小。正、负压力脉冲作用下,流场松弛时间基本相同,即松弛时间对压力脉冲极性的依赖性较小。

3.3 压力脉冲幅值的影响

图 7 给出了脉冲幅值 A 对正、负压力脉冲传播特性的影响。对于正压力脉冲,随其幅值增大,平均波速逐渐增大,衰减率逐渐减小。脉冲幅值由 10 kPa 增大至 100 kPa 时,波速由 7.77 m/s 增大至 7.93 m/s,衰减率由 2.04 dB/m 减小至 2.03 dB/m,这是由于随着正压力脉冲幅值越大,两相介质可压缩性变小,冷凝长度缩短导致。对于负压力脉冲,其传播特性随幅值变化规律则相反。松弛时间皆随着正、负压力脉冲幅值增大而明显增大,幅值 10 kPa 时约为 1.15 s,100 kPa 时约为 2.18 s,这是由于脉冲幅值越大,对两相流态稳定性破坏程度越大,则恢复至相对平衡状态所需时间越长。

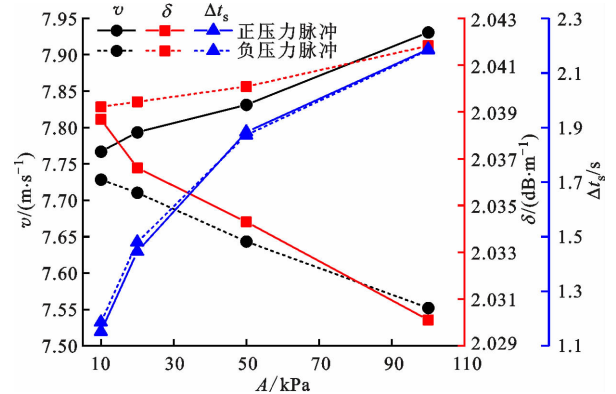


图 7 压力脉冲幅值对其传播和流场松弛特性的影响
Fig. 7 Effect of pressure pulse amplitude on pulse propagation and flow relaxation

3.4 压力脉冲持续时间的影响

图 8 给出了脉冲持续时间 t_0 对正、负压力脉冲

在低温两相流中传播特性的影响。当持续时间由 0.01 s 增加为 1 s 时,正、负压力脉冲平均波速均由约 8.5 m/s 降低至约 3 m/s,衰减率也有不同程度减小,这是由于当脉冲持续时间较大时,管内两相间有充分时间进行质量、动量和能量交换,相间接近机械与热力学平衡,导致压力脉冲平均波速与衰减率相对较小^[17]。在脉冲持续时间较大时,平均波速与衰减率的变化较小,当持续时间减小至约 0.3 s 以下时,平均波速与衰减率的变化率增大,在无限接近 0 s 时,平均波速变化趋于平缓,平均衰减率的变化率则持续增大,上升趋势变陡。

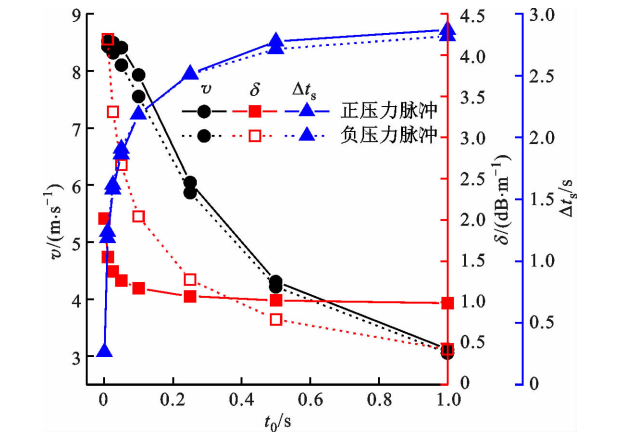


图 8 脉冲持续时间对压力脉冲传播和流场松弛特性的影响
Fig. 8 Effect of pressure pulse duration on pulse propagation and flow relaxation

松弛时间随脉冲持续时间增加而增加,当持续时间由 0.01 s 增加为 1 s 时,松弛时间由 0.26 s 增加为 2.87 s。这是由于脉冲持续时间越长,其作用于两相介质时间越长,对管内平衡流态破坏程度越大,重新恢复至相对平衡状态时间越长。随脉冲持续时间持续增加,虽作用于两相介质时间增加,但是在管内平衡被破坏的同时,具有相对充足的时间恢复稳定,综合作用下松弛时间上升趋势逐渐减缓。

4 结 论

以液体火箭发动机液氧输送管路为研究对象,基于欧拉两流体模型,利用CFD仿真平台实现对低温气氧/液氧大温差两相流动冷凝中压力脉冲传播过程的动态模拟,分析了两相分布参数的瞬态变化以及压力脉冲极性等参数变化对传播特性的影响规律。主要结论如下:

(1)压力脉冲在低温气液两相流中波速远小于在液相单相中。模拟工况下,正压力脉冲在两相区波速约为1.6~12 m/s,在液氧单相区则可达到200 m/s。

(2)幅值 $A=100$ kPa、持续时间 $t_0=0.1$ s的正压力脉冲使气相冷凝长度较稳定压力时缩短约9.3%,相同参数负压力脉冲则使其延长约7%。小于松弛时间的连续压力脉冲,使管内压力变化持续叠加,波幅阶梯上升。

(3)其他条件一致时,随脉冲幅值增大,正压力脉冲波速逐渐增大,衰减率逐渐减小,负压力脉冲则相反;正、负压力脉冲波速与衰减率皆与脉冲持续时间呈负相关性,脉冲持续时间由0.01 s增加至1 s,正、负压力脉冲平均波速均减小约65%,平均衰减率则分别减小约51%和90%。

(4)松弛时间对脉冲持续时间的变化更为敏感,受脉冲极性影响较小。脉冲幅值由10 kPa增加至100 kPa,正、负压力脉冲松弛时间均增加了约1 s;脉冲持续时间由0.01 s增加至1 s,正、负压力脉冲松弛时间均增加约2.6 s。

参考文献:

- [1] 王娇娇,陈虹,厉彦忠,等.低温管路预冷过程两相流动与换热计算研究[J].西安交通大学学报,2019,53(1):93-99.
WANG Jiaojiao, CHEN Hong, LI Yanzhong, et al. Research on the two-phase flow and heat transfer characteristics of cryogenic pipeline chill-down process[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2019, 53(1): 93-99.
- [2] MALLOCK H R A. The damping of sound by frothy liquids[J]. Proceedings of the Royal Society of London: Series A Containing Papers of a Mathematical and Physical Character, 1910, 84(572): 391-395.
- [3] WOOD A. A text book of sound[M]. London, UK: G. Bill and Sons Ltd., 1941.
- [4] KARPLUS H B. Propagation of pressure waves in a

mixture of water and steam[EB/OL]. (1961-01-01)[2020-10-18]. <https://www.osti.gov/biblio/4012201-propagation-pressure-waves-mixture-water-steam>.

- [5] RUGGLES A E, LAHEY R T, DREW D A, et al. The relationship between standing waves, pressure pulse propagation, and critical flow rate in two-phase mixtures[J]. Journal of Heat Transfer, 1989, 111(2): 467-473.
- [6] RUGGLES A E. The propagation of pressure perturbations in bubbly air/water flows[D]. New York, USA: Rensselaer Polytechnic Institute, 1987.
- [7] MAHMOOD S, KWAK H Y. Pressure waves in bubbly liquids[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2016, 30(9): 3935-3943.
- [8] 李富林,何利民.气量增加段塞流场中压力波传播特性分析[J].油气地质与采收率,2004,11(5):78-80.
LI Fulin, HE Limin. Investigation on pressure wave propagation characteristics in slug flow field with increasing gas flow rate[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2004, 11(5): 78-80.
- [9] HUANG Fei, BAI Bofeng, GUO Liejin. A mathematical model and numerical simulation of pressure wave in horizontal gas-liquid bubbly flow[J]. Progress in Natural Science, 2004, 14(4): 344-349.
- [10] KUCZYŃSKI W. Modeling of the propagation of a pressure wave during the condensation process of R134a refrigerant in a pipe minichannel under the periodic conditions of hydrodynamic disturbances[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2013, 56(1/2): 715-723.
- [11] KUCZYŃSKI W. Characterization of pressure-wave propagation during the condensation of R404A and R134a refrigerants in pipe mini-channels that undergo periodic hydrodynamic disturbances[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2013, 40: 135-150.
- [12] KUCZYŃSKI W. Pressure wave propagation during the condensation process of the R404A refrigerant in mini-condenser under periodic hydrodynamic disturbances[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2013, 67: 404-415.
- [13] KUCZYŃSKI W. Phenomena that accompany the condensation of R404A refrigerant in multiports during hydrodynamic instabilities[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2012, 55(25/26): 7718-7727.
- [14] KUCZYŃSKI W, CHARUN H, BOHDAL T. Influence of hydrodynamic instability on the heat transfer coefficient during condensation of R134a and R404A

- refrigerants in pipe mini-channels [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2012, 55(4): 1083-1094.
- [15] 杨晨声, 方杰, 蔡国飙, 等. 压力波对垂直管低温气液掺混冷凝的影响 [J]. *火箭推进*, 2020, 46(2): 9-14.
- YANG Chensheng, FANG Jie, CAI Guobiao, et al. Research on influence of pressure wave on mixing and condensation of cryogenic gas-liquid two-phase flow in vertical pipe [J]. *Journal of Rocket Propulsion*, 2020, 46(2): 9-14.
- [16] CHEN Erfeng, LI Yanzhong, CHENG Xianghua. CFD simulation of upward subcooled boiling flow of refrigerant-113 using the two-fluid model [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2009, 29(11/12): 2508-2517.
- [17] 陈二锋, 厉彦忠, 应媛媛. 泵间管气液两相流压力波传播速度数值研究 [J]. *航空动力学报*, 2010, 25(4): 754-760.
- CHEN Erfeng, LI Yanzhong, YING Yuanyuan. Numerical investigation on pressure wave propagation speed of gas-liquid two-phase flow in pump pipeline [J]. *Journal of Aerospace Power*, 2010, 25(4): 754-760.
- [18] 李翠, 庄钰涵, 程亦薇, 等. 低温气液两相流中压力波传播特性研究 [J]. *低温工程*, 2019(1): 1-6.
- LI Cui, ZHUANG Yuhan, CHENG Yiwei, et al. Numerical investigation of pressure wave propagation in cryogenic two-phase oxygen flow [J]. *Cryogenics*, 2019(1): 1-6.
- [19] LI Cui, ZHUANG Yuhan, CHENG Yiwei, et al. Study on pressure wave propagation through cryogenic condensing two-phase flow in liquid rocket propellant feedline [J]. *Cryogenics*, 2020, 112: 103193.
- [20] 曾锐锐, 王柳, 高旭, 等. 低温管路系统预冷过程仿真研究 [J]. *真空与低温*, 2020, 26(3): 190-197.
- ZENG Ruirui, WANG Liu, GAO Xu, et al. Analysis on modeling chilldown process in cryogen transfer lines [J]. *Vacuum and Cryogenics*, 2020, 26(3): 190-197.
- [21] SCHILLER L. A drag coefficient correlation [J]. *Zeitschrift des Vereins Deutscher Ingenieure*, 1933, 77: 318-320.
- [22] BERTODANO M. Turbulent bubbly two-phase flow in a triangular duct [D]. New York, USA: Rensselaer Polytechnic Institute, 1992.
- [23] ANTAL S P, LAHEY R T, FLAHERTY J E. Analysis of phase distribution in fully developed laminar bubbly two-phase flow [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 1991, 17(5): 635-652.
- [24] TROSHKO A A, HASSAN Y A. A two-equation turbulence model of turbulent bubbly flows [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2001, 27(11): 1965-2000.
- [25] WANG H, PRIESTMAN G H, BECK S B M, et al. Measurement and simulation of pressure wave attenuation in upward air-water bubbly flow [J]. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2000, 21(1): 104-111.

(编辑 武红江 亢列梅)