

压力波对垂直管低温气液掺混冷凝的影响

杨晨声¹, 方 杰^{1,2}, 蔡国飙¹, 谭永华³

(1. 北京航空航天大学 宇航学院, 北京 102206;

2. 西安航天动力研究所, 陕西 西安 710100;

3. 航天推进技术研究院, 陕西 西安 710100)

摘 要: 为了分析高压补燃液氧煤油发动机氧泵间管内气液两相掺混冷凝及其压力波传播过程, 建立了可产生压力扰动的垂直管低温气液两相掺混实验系统, 以氧气/液氧为实验工质, 开展压力波对垂直管内低温气液两相掺混冷凝的影响研究, 获得了不同压力波频率和氧气流量工况下的掺混图像, 分析结果表明: 压力波会使发散流型由微弱振荡冷凝向间歇振荡冷凝转变, 使椭圆流型由稳定冷凝向振荡冷凝转变; 在 0 ~ 52 Hz 不同频率压力波作用下, 发散流型最大轴向冷凝长度与掺混孔径之比在 10 ~ 30 之间, 椭圆流型的比值在 8 ~ 15 之间变化; 压力波对气相摆动频率起主导性和正相关性的影响。

关键词: 垂直管; 低温气液两相流; 压力波; 掺混冷凝; 流型; 最大轴向冷凝长度; 气相摆动频率

中图分类号: V434.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374(2020)02-0009-06

Research on influence of pressure wave on mixing and condensation of cryogenic gas-liquid two-phase flow in vertical pipe

YANG Chensheng¹, FANG Jie^{1,2}, CAI Guobiao¹, TAN Yonghua³

(1. School of Astronautics, Beihang University, Beijing 102206, China;

2. Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an 710100, China;

3. Academy of Aerospace Propulsion Technology, Xi'an 710100, China)

Abstract: In order to study the gas-liquid mixing and condensation as well as the pressure wave propagation in the oxygen pump pipe of the high pressure staged combustion LOX/kerosene rocket engine, a cryogenic gas-liquid mixing in vertical pipe with pressure wave experiment system was constructed. The research on influence of pressure wave on mixing and condensation of cryogenic gas-liquid two-phase in vertical pipe was carried out with oxygen/LOX as working fluid. Interphase mixing images of different pressure wave frequencies and oxygen flow conditions were obtained. The results show that the pressure wave makes the divergent flow pattern change from weak oscillation condensation to intermittent oscillation condensation, and makes the elliptical flow pattern change from stable condensation to oscillation condensation. Under the influence of pressure waves with different frequencies from 0 to 52 Hz, the ratio

收稿日期: 2018-08-13; 修回日期: 2018-12-01

基金项目: 国家自然科学基金(51306007)

作者简介: 杨晨声(1993—), 男, 硕士, 研究领域为液体火箭发动机低温两相流压力波

of the maximum axial condensation length to the orifice diameter of the divergent flow pattern varies between 10 and 30, and the ratio of the elliptical flow pattern varies between 8 and 15. The pressure wave plays a leading and positive correlation to the plume swing frequency.

Keywords: vertical pipe; cryogenic gas-liquid two-phase flow; pressure wave; mixing and condensation; flow pattern; maximum axial condensation length; plume swing frequency

0 引言

在高压补燃液氧煤油火箭发动机氧涡轮泵系统中,驱动预压涡轮后的少量富氧燃气在预压泵出口处经集合器通过管壁小孔注入泵间管,与液氧主流发生掺混,并冷凝为液相,这是一个典型的低温气液两相流动与传热相变过程^[1-2]。而在火箭发动机输送系统中,涡轮泵的旋转及汽蚀不可避免地会对推进剂流动产生小扰动,并以压力波的形式在管路中传播,从而对垂直放置的泵间管内低温气液两相掺混冷凝过程产生影响^[3-4]。因此,研究垂直管内低温气液两相掺混冷凝及其压力波传播过程具有重要的现实意义。

国内外学者对气液两相掺混相变过程已经开展了大量研究工作。Chun、A. Petrovic de With 和 Qiang Xu 等人分别对水蒸汽接触冷凝过程的流型及气羽形状特征等进行了归纳^[5-7]; Kerney、Kim 等人对蒸汽射流中气羽穿透长度进行了实验研究,并各自总结了经验公式^[8-9]。针对垂直管内存在相变的低温气液两相工质流动, Yanzhong Li 等人基于数值仿真研究了压力波的传播特性^[10-11]; Xiangdong Li 采用 MUSIG 模型分析了氮气气泡在液氮中上升的动态过程,并与实验结果进行了对比^[12]; 薛传发、方雪健等研究了低温工质两相掺混动态特征,辨识梳理了典型的流型,得到了最大轴向冷凝长度随流量、压力等参数的变化规律^[13-17]。关于压力波对气液两相掺混相变过程影响的研究报道相对较少。Waldemar 通过实验研究了压力扰动对直径小于 5 mm 的微通道内制冷剂 R134a 相变过程的影响,结果表明:在一定频率范围内,压力波会使气液两相区长度变长^[18]。

考虑到流场结构和低温工质的特殊性,本文针对高压补燃液氧煤油发动机氧泵间管内气液两相掺混冷凝及其压力波传播过程,建立了适用于低温工质且可产生压力扰动的垂直管气液两相掺混实

验系统,采用氧气/液氧为实验工质,获得了不同压力波频率和氧气流量工况下的两相掺混图像,分析了压力波对垂直管内氧气/液氧掺混相变流型及其动态特性的影响。

1 实验系统与方法

1.1 实验系统

可产生压力扰动的垂直管低温气液两相掺混实验系统主要包括液相管路、气相管路、两相掺混管路和压力扰动装置,如图 1 所示。

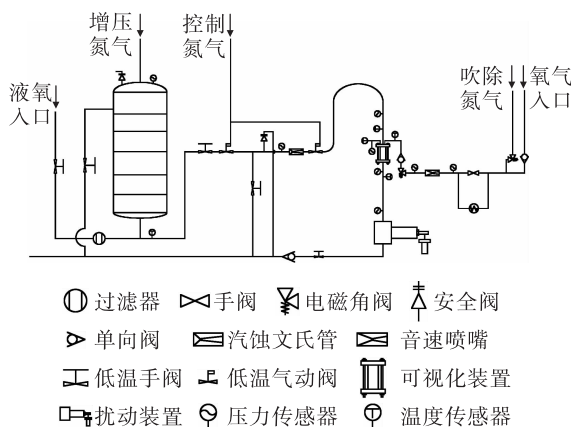


图 1 实验系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental system

通过调节汽蚀文氏管和音速喷嘴的上游压力可分别控制液相管路和气相管路的流量。垂直放置的两相掺混管路以某高压补燃液氧煤油发动机泵间管为原型,根据几何相似进行缩尺设计;将泵间管壁周向均布的多个掺混孔简化设计为两个对称分布的混流孔,气体通过混流孔注入低温液体发生掺混冷凝;为便于观测,将两相掺混管路设计为双层玻璃管结构的可视化装置^[19]。在可视化装置下游管路以旁通的方式安装压力扰动装置,调节该装置的电机转速可以向掺混管内施加不同频率的压力波^[20]。实验工况中的流场参数,根据欧拉数相

似和单孔含气率相似准则,在对发动机实际工况进行相似变换得到的基准值附近进行设置。实验系统主要结构参数和实验工况如表 1 所示。

表 1 实验系统主要结构参数和实验工况
Tab.1 Main structural parameters and experimental conditions of the experimental system

参数名称	参数值
掺混管内径/mm	20
混流孔内径/mm	2
混流孔角度/(°)	90
液氧流量/(g·s ⁻¹)	615
氧气流量/(g·s ⁻¹)	1.63,3.27
掺混压力/MPa	1
压力波频率/Hz	0~52

实验系统采用溅射薄膜压力传感器采集压力信号,精度为 0.1%;采用 K 型热电偶和 PT 热电阻分别测量气/液相工质温度,精度为 0.5 K;采用 MS75K CMOS 高速摄影仪进行光学图像采集,帧率为 1 000 fps,分辨率为 504×504,背景光源使用无频闪的 LED 背光灯,如图 2 所示。

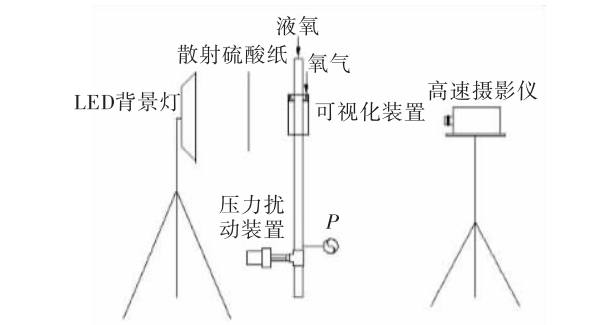


图 2 光学图像采集示意图
Fig.2 Schematic diagram of optical image collection

1.2 实验方法

对图 2 中接近压力扰动装置测点处的压力信号进行带通滤波处理和快速傅立叶变换,将其主频作为压力波频率进行调节控制。图 3 给出了某实验工况下经过信号处理的压力信号及其频谱图,其中压力信号采样频率为 2 000 Hz,压力波主频为 25 Hz。

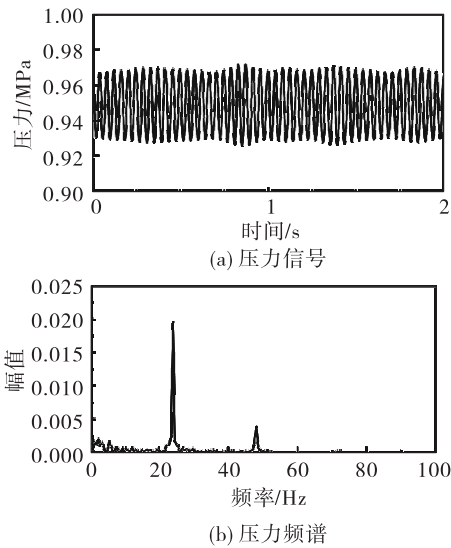


图 3 压力信号及其频谱图
Fig.3 Pressure signal and its spectrum

采用高速摄影仪逆光拍摄得到的垂直管内两相掺混冷凝的图像如图 4 所示,其中白色区域为液相区,黑色区域为气相区,包括气相核心区及脱离的气泡,灰色区域为气液混合区。轴向冷凝长度 L 定义为气相自混流孔沿轴向的穿透距离。

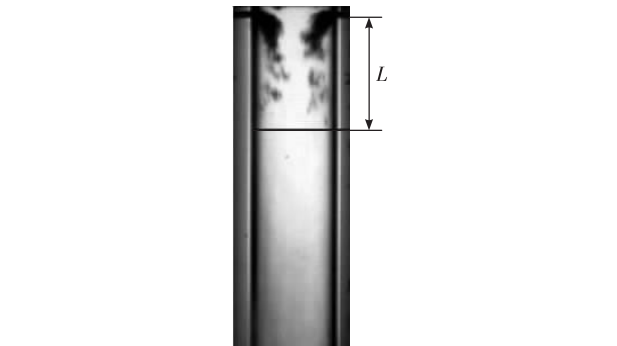


图 4 轴向冷凝长度定义
Fig.4 Definition of axial condensation length

实验前预先在玻璃管壁上沿轴向标定刻度,通过轴向刻度值与像素点对应比例,可得到轴向冷凝长度的绝对值,即对每一帧图像,轴向冷凝长度 $L = L_0/n_0 \times N$,其中 N 为从混流孔沿轴向至气相消失处的像素点总数, L_0 为单位轴向长度, n_0 为单位轴向长度对应的像素点数。由于掺混冷凝实际是一个动态变化过程,因此对稳定掺混段的连续 3 000 帧图像进行二值化叠加处理,将叠加图中混流孔到气相消失处轴

向距离作为最大轴向冷凝长度 \bar{L} 进行观测分析,如图 5 所示。

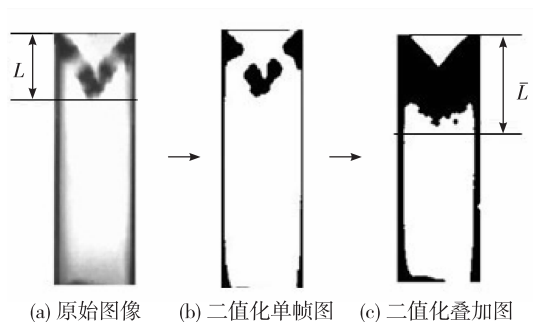


图 5 基于二值化叠加的最大轴向冷凝长度

Fig. 5 Maximum axial condensation length based on two-value superposition

气相核心区在气液掺混冷凝过程中会发生周期性摆动,其频率定义为气相摆动频率。实验中,通过高速摄影记录气相核心区发生连续多个摆动周期的时间并取平均值,可得到气相摆动频率,从而开展相关分析。

2 实验结果与分析

2.1 掺混流型

根据课题组之前的研究成果,无压力波作用时,氧气/液氧掺混冷凝过程主要呈现为发散和椭圆两种典型流型^[16]。图 6 和图 7 分别给出了发散流型和椭圆流型在压力波影响下的周期性掺混动态过程。

当氧气流量为 1.63 g/s 且无压力波作用时,垂直管内掺混冷凝段为发散流型,气相核心区在近壁区域进行微弱的伸缩摆动,下游分离出较多气泡,如图 6(a) 所示。在掺混段下游施加压力波扰动后,离散的气泡相应变少,气相核心区在掺混管中心区域和混流孔之间的伸缩摆动周期减小、幅度增大;气液界面会周期性地退回混流孔内,掺混动态过程从微弱振荡冷凝转变为间歇振荡冷凝,如图 6(b) 所示。

当氧气流量为 3.27 g/s 且无压力波作用时,垂直管内掺混冷凝段为椭圆流型,气相核心区稳定位于掺混管中心区域,下游分离出少量气泡,如图 7(a) 所示。施加压力波扰动后,气相核心区在掺混管中心区域和混流孔之间进行伸缩摆动,掺混动态过程从稳定冷凝向振荡冷凝转变,如图 7(b) 所示。

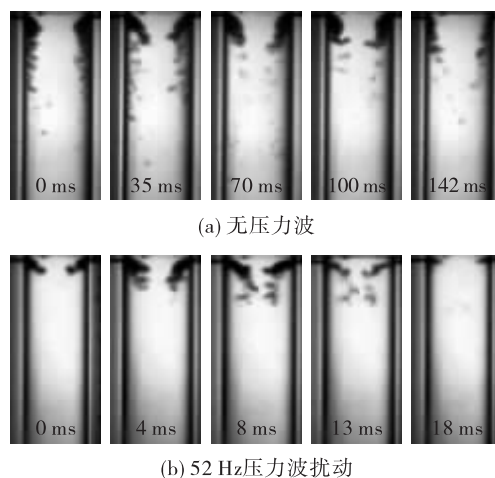


图 6 压力波对发散流型的影响

Fig. 6 Influence of pressure wave on divergent flow pattern

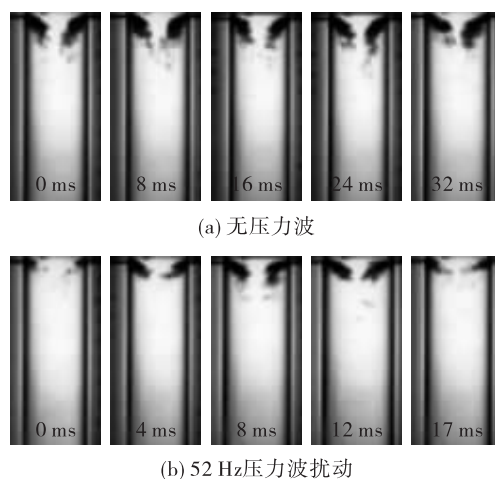


图 7 压力波对椭圆流型的影响

Fig. 7 Influence of pressure wave on elliptical flow pattern

2.2 最大轴向冷凝长度

在高压补燃液氧煤油火箭发动机的涡轮泵设计中,要求进入主泵的工质为纯液相,以避免发生汽蚀。因此,确定垂直管内最大轴向冷凝长度对泵间管结构设计具有重要意义。

图 8 给出了发散流型和椭圆流型在不同压力波频率影响下的最大轴向冷凝长度的分布情况。可以看出,当受到不同频率压力波扰动时,发散流型的最大轴向冷凝长度变化范围较大,其数值与掺混孔径之比在 10 ~ 30 之间;而椭圆流型的最大轴向冷凝长度分布相对集中,其数值与掺混孔径之比在 8 ~ 15 之间。

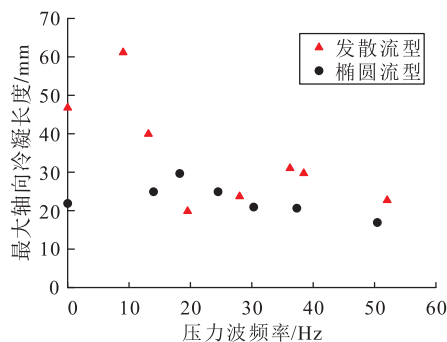


图8 压力波频率对最大轴向冷凝长度的影响

Fig. 8 Effect of pressure wave frequency on maximum axial condensation length

从低温气液两相流动与传热相变的过程分析,压力波一方面使液相流动的不稳定性和湍流水平增加,从而增强了相间作用;另一方面使得摆动的气相核心区更容易分离出气泡,而气泡冷凝消失的极限位置决定了最大轴向冷凝长度的大小。当压力波频率较低时,液相湍流水平增加不明显,气相核心区分离出的气泡尺寸较大,相间有充分时间进行质量、动量和能量的交换,接近平衡状态,因此最大轴向冷凝长度相对较大。当压力波频率较高时,湍流水平增强,气相核心区分离出的气泡尺寸更小,相间作用加剧,小尺寸气泡进入液相后会迅速冷凝,因此最大轴向冷凝长度会出现减小趋势。

对于发散流型,气相区长度较长,核心区更易分离出气泡,而气泡运动受液相流场影响很大,因此随着压力波频率改变,发散流型的最大轴向冷凝长度变化范围较大;而椭圆流型的气相主要为气相核心区,其对流场变化相对不敏感,因此不同压力波频率下椭圆流型的最大轴向冷凝长度的分布相对集中。

2.3 气相摆动频率

气相核心区的摆动反映了掺混冷凝过程的动态不稳定性。气相摆动频率是表征垂直管内气液两相掺混冷凝动态过程的重要参数。

图9给出了气相摆动频率与压力波频率的关系。可以看出,压力波对气相摆动频率有正相关性影响,气相摆动频率随着压力波频率的升高而升高,其值略高于压力波的频率。在压力波作用下,相对于发散流型,椭圆流型的气相摆动频率更高。

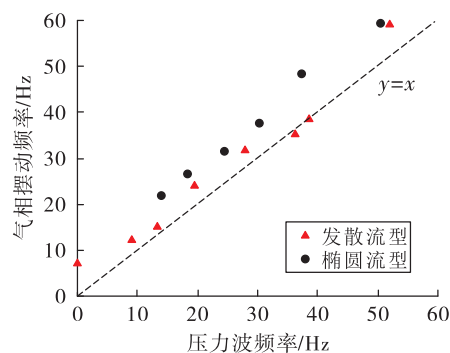


图9 压力波频率对气相摆动频率的影响

Fig. 9 Effect of pressure wave frequency on plume swing frequency

对于无相变的掺混过程,气相摆动只受压力波的影响,气相核心区会在压力波驱动下发生与扰动源同频率有相位差的摆动,如图9中虚线所示。而对于低温两相掺混冷凝过程,由于掺混相变的作用,即使无压力波的影响,气相核心区也会发生周期性摆动^[14]。从图9可以知,实验中气相核心区的摆动是压力波和掺混相变两种因素共同作用的结果,且压力波的作用占主导。椭圆流型较发散流型的气相核心区范围更大,掺混相变因素的影响更为明显,因此椭圆流型的气相摆动频率相对更高。

3 结论

本文以高压补燃液氧煤油火箭发动机氧预压泵出口处气液两相掺混冷凝及其压力波传播过程为背景,采用氧气/液氧作为实验工质,开展了压力波对垂直管内低温气液两相掺混冷凝的影响研究,得到以下结论:

1) 压力波对掺混流型有明显影响。在实验工况范围内,氧气流量为1.63 g/s时,主要为发散流型,在掺混段下游施加压力波扰动后,掺混动态过程由微弱振荡冷凝向间歇振荡冷凝转变;氧气流量为3.27 g/s时,主要为椭圆流型,施加压力波扰动后,掺混动态过程由稳定冷凝向振荡冷凝转变。

2) 在不同频率压力波作用下,发散流型的最大轴向冷凝长度变化范围较大,而椭圆流型的最大轴向冷凝长度分布相对集中。本实验中,发散流型最大轴向冷凝长度与掺混孔径之比在10~30之间,椭圆流型的在8~15之间。该比值对于同类型发动机

的泵间管结构设计具有一定的参考价值。

3) 气相核心区的摆动是压力波和掺混相变两种因素共同作用的结果,且压力波的作用占主导。压力波对气相摆动频率有正相关性影响。在压力波作用下,椭圆流型较发散流型的气相摆动频率更高。

参考文献:

- [1] 张贵田. 高压补燃液氧煤油发动机[M]. 北京:国防工业出版社, 2005.
- [2] 李向阳, 王晓峰, 宣统, 等. 液氧/煤油发动机煤油预压涡轮泵技术[J]. 火箭推进, 2009, 35(1):16-20.
LI X Y, WANG X F, XUAN T, et al. Techniques of kerosene booster turbopump for LOX/kerosene staged combustion cycle engine[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2009, 35(1):16-20.
- [3] 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.
- [4] 唐飞, 李家文, 李永, 等. 热力学效应对低温诱导轮旋转变汽蚀影响的数值研究[J]. 火箭推进, 2013, 39(2):29-34.
TANG F, LI J W, LI Y, et al. Influence of thermodynamics effect on inducer rotating cavitation under low temperature condition[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2013, 39(2):29-34.
- [5] CHUN M H, KIM Y S, PARK J W. An investigation of direct condensation of steam jet in subcooled water[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 1996, 23(7):947-958.
- [6] PETROVIC D E WITH A, CALAY R K, DE WITH G. Three-dimensional condensation regime diagram for direct contact condensation of steam injected into water[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2007, 50(9/10):1762-1770.
- [7] XU Q, GUO L J, ZOU S F, et al. Experimental study on direct contact condensation of stable steam jet in water flow in a vertical pipe[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2013, 66:808-817.
- [8] KERNEY P J, FAETH G M, OLSON D R. Penetration characteristics of a submerged steam jet[J]. AICHE Journal, 1972, 18(3):548-553.
- [9] KIM Y S, YOUN Y J. Experimental study of turbulent jet induced by steam jet condensation through a hole in a water tank[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2008, 35(1):21-29.
- [10] LI Y Z, LI C, CHEN E F, et al. Pressure wave propagation characteristics in a two-phase flow pipeline for liquid-propellant rocket[J]. Aerospace Science and Technology, 2011, 15(6):453-464.
- [11] 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.
- [12] LI X D, ZHANG H, WANG R S, et al. MUSIG modeling and evaluation of nitrogen bubble coalescence in a bottom-closed vertical tube[J]. Aerospace Science and Technology, 2010, 14(3):203-212.
- [13] 薛传发, 方杰, 方雪健, 等. 垂直管内气液两相掺混冷凝可视化研究[C]//中国航天第三专业信息网第三十五届技术交流会. 北京:中国航天第三专业信息网, 2014.
- [14] 薛传发. 垂直管道低温气液两相掺混的流型辨识[D]. 北京:北京航空航天大学, 2015.
- [15] 方雪健, 方杰, 刘雪峰, 等. 垂直管道氧气-液氧两相掺混轴向冷凝长度研究[C]//中国航天第三专业信息网第三十六届技术交流会. 北京:中国航天第三专业信息网, 2015.
- [16] 方雪健. 垂直管道气液两相掺混及其压力波研究[D]. 北京:北京航空航天大学, 2016.
- [17] 杨晨声. 垂直管道气液两相掺混流压力波研究[D]. 北京:北京航空航天大学, 2018.
- [18] KUCZYSKI W, BOHDAL T, CHARUN H. Impact of periodically generated hydrodynamic disturbances on the condensation efficiency of R134a refrigerant in pipe mini-channels[J]. Experimental Heat Transfer, 2013, 26(1):64-84.
- [19] 方杰, 薛传发, 方雪健, 等. 一种适用于低温气液两相掺混的可视化试验装置:ZL201510012811. 8[P]. 2017-07-11.
- [20] 方杰, 方雪健, 杨晨声, 等. 一种适用于低温介质的压力扰动装置:ZL201610177596. 1[P]. 2018-04-17.