

文章编号: 1672-8785(2017)09-0039-08

基于单相泵流体换热回路的气液分离试验研究

王仕越^{1,2} 谢荣建^{1,2} 张 添^{1,2} 芮骥才^{1,2} 吴亦农¹

(1. 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 针对天基红外凝视与扫描观测系统的载荷冷却需求, 具有流体传输和热传输能力强、扬程大以及可调节性较强等优点的泵流体回路可用作长距离、大面阵、分布性载荷的冷却回路。在单相流体回路中, 对气相分数的控制非常重要。介绍了一种基于多孔介质中两相流体的流动机理实现气液两相分离的装置及其设计思路和试验验证方法。通过数值计算及仿真得到了优化参数, 测量了回路中的流动参数, 并验证了此装置的气液分离效果。

关键词: 泵流体回路; 气液分离; 微观可视化

中图分类号: TB6 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2017.09.007

Experimental Investigation of Liquid-gas Separation Based on Single Phase Pump Driving Circuit

WANG Shi-yue^{1,2}, Xie Rong-jian^{1,2}, ZHANG Tian^{1,2}, RUI Ji-cai^{1,2}, WU Yi-nong¹

(1. Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In the light of the payload cooling requirements of space-based infrared staring and scanning observation systems, pump driving circuits having advantages of strong fluid and heat transferring, high-lift and high adjustability can be used as the cooling circuits for long distance large area array distribution payloads. It is very important to control the gas void fraction in a single phase liquid circuit. A gas-liquid separation device based on the flow mechanism of two phase fluid in a porous zone is designed. Its design ideas and test verification are presented. Optimized parameters are obtained through numerical calculation and simulation. Flow parameters are measured. The gas-liquid separation effectiveness of this device is verified.

Key words: pump driving circuit; gas-liquid separation; microcosmic visualization

0 引言

天基红外观测系统的工作温度需要维持在 250 K 左右, 而在空间环境中, 需要保持特定

低温的热负载除了宇宙背景辐射之外, 光阑本身对观测系统主体的辐射也是一个不可忽视的因素。因此, 须对光阑本身进行冷却。与传统的热管与蜂窝板散热形式相比, 将泵流体回路

收稿日期: 2017-04-05

作者简介: 王仕越(1987-), 男, 黑龙江哈尔滨人, 博士研究生, 主要从事泵驱动流体换热回路以及空间有效载荷热控技术研究。E-mail: sywang0309@163.com

耦合到光阑结构中,更加适合大面阵、长距离、变负载、分布式的冷却目标,同时还可使结构变得更加轻量化,布置也变得更加灵活。

在空间应用中,与热管相比,泵流体回路在相同传输功率下的温差一般更小,结构尺寸更加紧凑;流体管线的空间排布也更加灵活,但是人们对泵流体回路的使用一直较为谨慎。除了泵本身由于存在运动部件会增加系统的不稳定性之外,更为重要的原因是流体工质在泵内极易产生气体组分,进而限制泵流体回路的换热和流动;同时产生的气蚀也会使关键的驱动部件——泵体的寿命大大缩短,从而降低系统的可靠性。

在无重力条件下,管内气液两相流的流型通常为弹状流,一般存在于气相分数较小、雷诺数也较小的流动中;环状流一般存在于气相分数较大、雷诺数不超过 4300 或者热流密度较大的加热流体的紊流流动中;泡状流一般存在于气相分数较小的紊流流动中;雾状流一般存在于气相分数较大的紊流流动中。在不考虑相变换热的情况下,这几种两相流的换热系数一般都小于同一温度、同一压力下的液体单相流。其中,环状流和雾状流由于与壁面接触的大部分为气相,换热系数会显著降低。气相与液相在密度和惯性上的差异会造成动能损失;气液交界面的不断变化会造成流动核心区的减少,从而导致沿程流动阻力的增大。这两种原因最终会造成气液两相流的阻力压降相对于单相流明显增加,而且有限的泵扬程更加难以满足流体传输的需要。国内外针对减少流体回路中气相组分的机理与装置研究屡见报道。文献 [1-6] 分别对用于阻力区域和流动惯性的气液分离装置的设计机理及试验结果进行了阐述。

基于惯性的气液分离装置需要在沿流动方向上产生旋流,同时需要有一定的流速才能实现分离装置管路中在径向方向上的压力梯度,从而使气液两相处于过流断面上不同的径向位置。由于对管路中流体的流动速度有较高的要

求,此种方法在很大程度上无法用于雷诺数较小的回路。

本文基于气液两相在多孔介质中的流动特征,设计了一种阻力气液分离装置。该装置能够在一定程度上控制换热回路中的气相分数,同时使流体驱动泵的流体输运效率变得更高。

1 理论分析

假定流动过程中无相变且没有高度变化,则唯一压降为流体的流阻压降。根据 Lockhart-Martinelli 关系式确定两相流分相流模型,其中两相压降为

$$(\Delta P/\Delta L)_{TP} = \phi_L^2 (\Delta P/\Delta L)_L \quad (1)$$

式中, ϕ_L 为液相折算系数,即

$$\phi_L = [1 + C/\chi + 1/\chi^2]^{1/2} \quad (2)$$

Lockhart-Martinelli 参数由式 (3) 确定 [7]:

$$\chi^2 = \frac{(\Delta P/\Delta L)_L}{(\Delta P/\Delta L)_G} = \frac{C_L (Re_G)^m \rho_G}{C_G (Re_L)^m \rho_L} \cdot \left(\frac{1-x}{x} \right)^2 \quad (3)$$

同时确定液体与气体分相的雷诺数:

$$Re_L = \frac{D \dot{m}_L}{A_c \mu_L} = \frac{D \dot{m}_{total} (1-x)}{A_c \mu_L} \quad (4)$$

$$Re_G = \frac{D \dot{m}_G}{A_c \mu_G} = \frac{D \dot{m}_{total} x}{A_c \mu_G} \quad (5)$$

式中, $\dot{m}_L$ 、 $\dot{m}_G$ 和 $\dot{m}_{total}$ 分别为液体折算质量流量、气体折算质量流量和整体表观质量流量; A_c 为过流断面的面积; μ_L 和 μ_G 分别为液体和气体动力粘度。

液体的单位长度压降可通过特定的压降系数计算:

$$(\Delta P/\Delta L)_L = \frac{f_L (\dot{m}_L/A_c)^2}{2 \rho_L D} \quad (6)$$

式 (2) 和式 (3) 中的系数分别由表 1 和表 2 根据雷诺数确定。

利用流化床压降公式计算多孔介质区域中的阻力系数和单位压降。以多孔介质中的特征雷诺数 Re_ε 确定 $Re_\varepsilon < 10$ 时,利用 Blake-Kozeny 方程:

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{150(1-\varepsilon)^2}{d^2 \varepsilon^3} \cdot \mu u \quad (7)$$

表 1 Lockhart–Martinelli 关系式的系数

系数	层流 Re<2000	紊流过渡 3000<Re<50000	紊流 Re>50000
m (气体)	1	0.25	0.2
n (液体)	1	0.25	0.2
C_G (气体)	64	0.316	0.184
C_L (液体)	64	0.316	0.184

表 2 Lockhart–Martinelli 折算系数 C

液体流动特征	气体流动特征	C 取值
层流	层流	5
紊流	层流	10
层流	紊流	12
紊流	紊流	20

Re $\varepsilon > 1000$ 时, 利用 Burke–Plummer 方程:

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{7(1-\varepsilon)}{4d\varepsilon^3} \cdot \rho u^2 \quad (8)$$

过渡区用 Ergun 方程^[8]:

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{150(1-\varepsilon)^2}{d^2\varepsilon^3} \cdot \mu u + \frac{7(1-\varepsilon)}{4d\varepsilon^3} \cdot \rho u^2 \quad (9)$$

选取液体为酒精, 其密度为 $0.84 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, 粘度为 $1.084 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$; 选取气体为空气, 其密度为 1.21 kg/m^3 , 粘度为 $1.62 \times 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 。

假定流体中气相的体积组分为 20%, 可以分别算得在不同定型尺寸、不同孔隙率填料中两相流体与单相流体的单位长度压降之比 (见图 1)。

利用丝网重叠构建目标多孔介质区域。根据工艺确定主分离区域的丝径为 0.16 mm, 孔径为 0.355 mm, 孔隙率为 0.55; 次分离区域的丝径为 0.28 mm, 孔径为 0.71 mm, 孔隙率为 0.45。然后分别计算气体与液体的惯性阻力系数和粘性阻力系数。其中, 惯性阻力系数为

$$C_2 = \frac{3.5}{d} \cdot \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon^3} \quad (10)$$

粘性阻力系数为

$$\frac{1}{\alpha} = \frac{150}{d^2} \cdot \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^2} \quad (11)$$

表 3 两种分离区域中的惯性阻力系数和粘性阻力系数

	惯性阻力系数	粘性阻力系数
主分离区域	59166	7.13×10^9
次分离区域	26666	1.45×10^9

通过计算得到两种分离区域中的惯性阻力系数和粘性阻力系数 (见表 3)。

将计算结果代入到 CFD 软件中进行模拟, 得到了图 2 所示的稳态结果。可以看出, 主分离区域的液相分数明显增大, 而次分离区域的液相分数则明显减小。分别将不同液相体积分数和入口速度下的分离效果提取出来, 并对仿真与理论计算的压降结果进行了对比 (结果见表 4)。

2 实验验证

为了验证回路中的相分离效果, 我们设计了一种流体回路测试系统。该系统由专用地检系统 (含测控软件)、直流电源、数字采集设备、常温及低温压力传感器、常温及低温质量流量计、常温及低温液位计、温度传感器、加热器、制冷机、真空模拟设备、真空泵以及其他配件设备构成。

本文系统可直接对温度、压力、质量流量和气相组分变化量等参数进行测试; 通过换算可获得换热系数、流动粘性阻力、局部阻力以及由以上参数得到的流体物性等目标参数; 能够测试流体及制冷量传输能力、换热器的换热能力、各流体部件的阻力压降以及气相组分分离能力等。图 3 和图 4 分别为测试系统的原理图和实物图。

利用压电式压力传感器分别采集了泵前后的压力波动数据, 得到了启用气液分离器前后的泵压力波动特征 (见图 5)。图 5(a) 中, 泵的驱动电压为 1.7 V, 未启用气液分离器; 图 5(b) 中, 泵的驱动电压为 1.7 V, 已启用气液分离器; 图 5(c) 中, 泵的驱动电压为 2.4 V, 未启用气液分离器; 图 5(d) 中, 泵的驱动电压为 2.4 V, 已启用气液分离器。

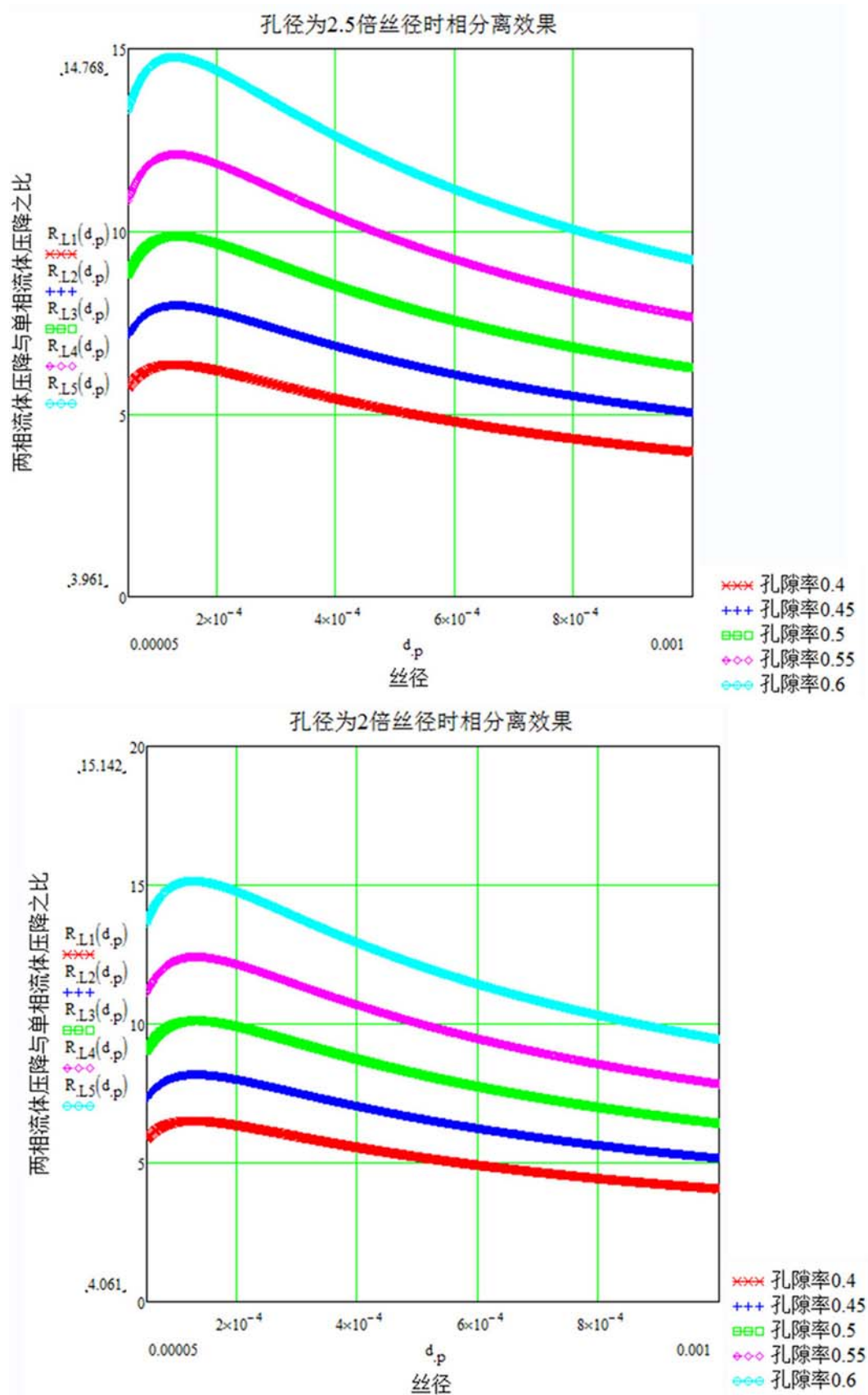


图1 不同定型尺寸、不同孔隙率填料中两相流体与单相流体的单位长度压降之比

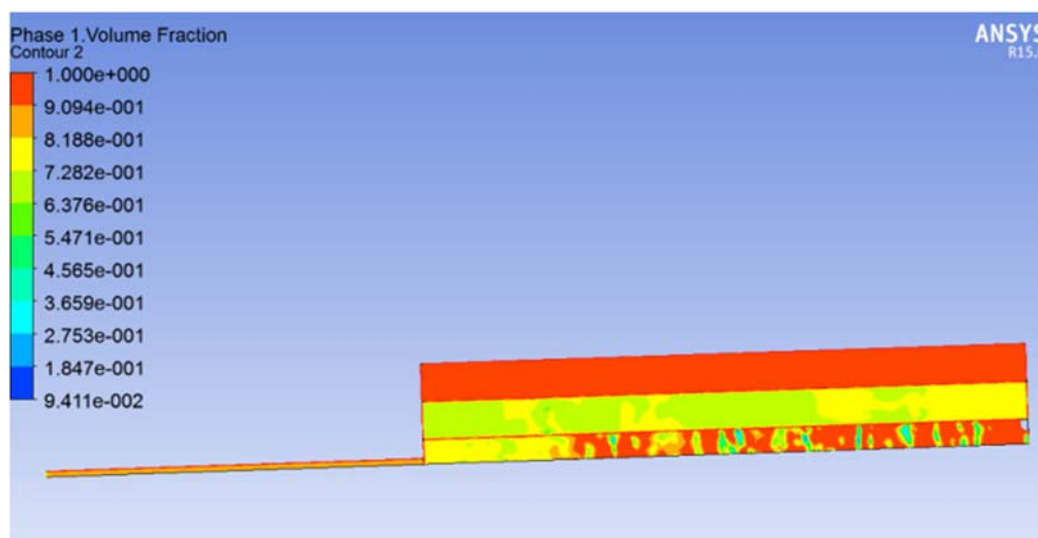


图 2 多孔介质相分离稳态仿真结果

表 4 经仿真得到的分离效果与压降对比情况

入口液相 体积分数	入口速度 (m/s)	管路 雷诺数 (液体)	主阻力区域 雷诺数 (液体)	主分离区域 出口液相 体积分数	次分离区域 平均液相 体积分数	阻力区域 总体压降 (Pa) 计算值/仿真值
0.7	0.6	3210	99.5	0.99	0.54	464/687
	0.9	4820	149.4	0.98	0.61	568/782
	1.2	6420	199.2	0.96	0.69	703/799
0.8	0.6	3210	99.5	0.99	0.63	453/613
	0.9	4820	149.4	0.98	0.66	546/671
	1.2	6420	199.2	0.98	0.70	682/701

从图 5 中可以看出, 在启用气液分离装置后, 泵驱动压力明显处于较为稳定的状态。

在泵压力波动测试中, 可得到以下直观的观察结果:

(1) 在关闭和开启气液分离器时, 泵后方的压力波动都会突然变小一段时间(约 2 ~ 11 转)。这是由于泵腔中气体分数积聚, 在一段时间后泵腔内液相分数过小、气体分压力增大导致泵驱动压力减小所造成的。将这段波动命名为“失效周期”。

(2) 在关闭和开启气液分离器时, 某一周期(包含 3 个波峰与波谷)中都会突然出现波动周期变长的现象。由于气泡积聚体积过大, 在泵的出口处因表面张力会形成较大的突然的阻力, 导致泵驱动周期出现扰动。将这段波动命名为“扰

动周期”, 并将泵的评价标准定为考察每个工况中出现“失效周期”和“扰动周期”的数量。这样就可以对不同工况下的压力波动进行量化与比较。

在泵驱动电压为 1.7 V 的工况下, 100 个数据点中有 80% 不超过 0.02 V 时将其定义为“失效周期”。在泵驱动电压为 2.4 V 的工况下, 100 个数据点中有 80% 不超过 0.025 V 时将其定义为“失效周期”。

在泵驱动电压为 1.7 V 的工况下, 100 个数据点中两个波峰间的偏差超过 0.2 ms (两个波峰间的平均时间为 1.42 ms) 时将其定义为“扰动周期”; 在泵驱动电压为 2.4 V 的工况下, 100 个数据点中两个波峰间的偏差超过 0.12 ms (两个波峰间的平均时间为 0.83 ms) 时将其定义为“扰动

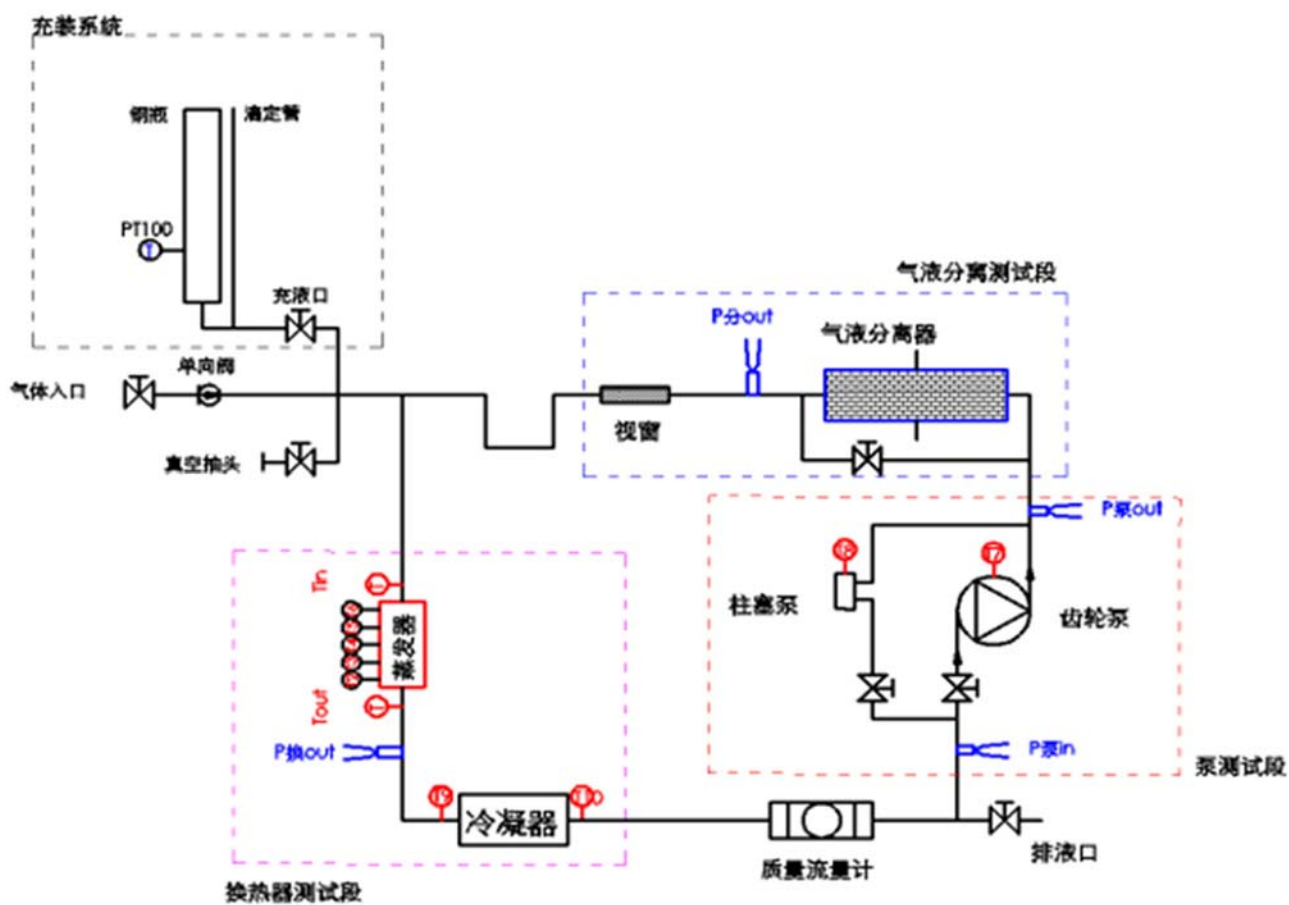


图 3 测试系统的原理图

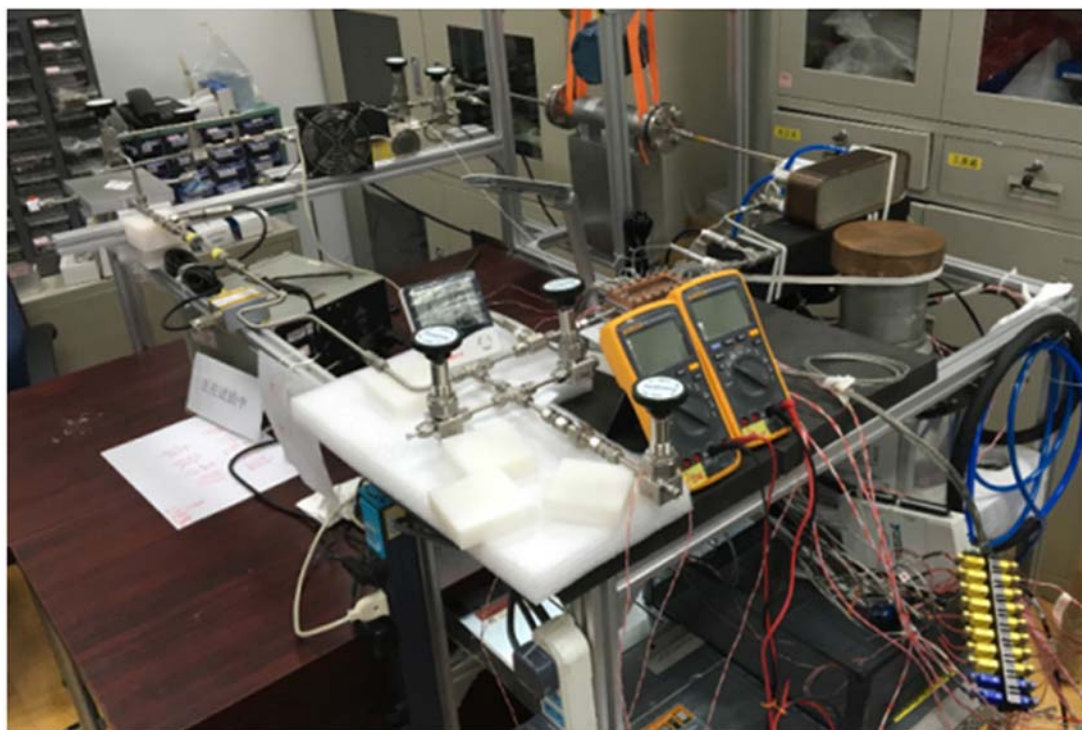


图 4 测试系统的实物图

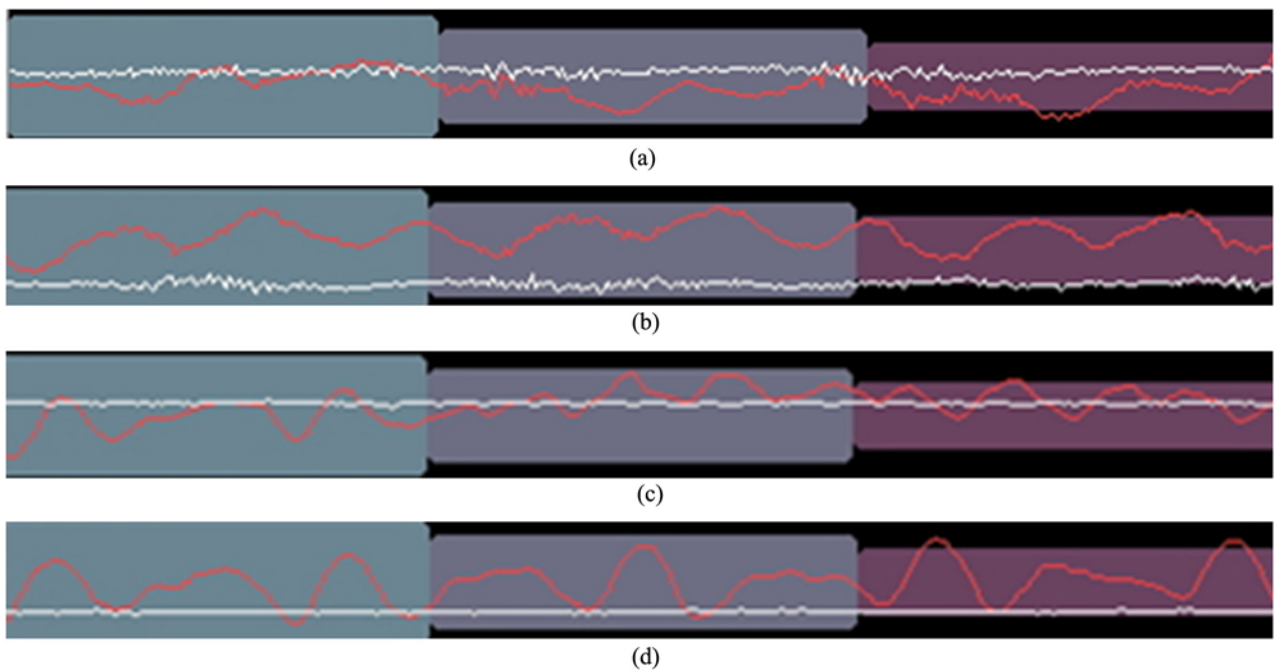


图 5 使用气液分离器前后的泵压力特征

表 5 不同工况下的泵驱动特性对比

泵转数 控制电压 (V)	气液分离器 是否启用	总周期数	失效周期数	扰动周期数	失效周期占比	扰动周期占比
1.7	否	509	118	25	23.18%	4.91%
		755	234	51	30.99%	6.75%
	是	440	37	9	8.41%	2.05%
		893	92	28	10.30%	3.14%
2.4	否	474	152	44	32.07%	9.28%
		443	115	32	25.96%	7.22%
	是	684	62	21	9.06%	3.07%
		534	58	6	10.86%	1.12%

周期”。表 5 列出了不同工况下的泵驱动特性统计结果。

从前面的分析中可以得到以下结论：

(1) 无论是否开启气液分离器，泵的压力波动都会处于比较严重的气蚀状态；失效周期和扰动周期都具有一定的占比，其中失效周期在 8% 以上，扰动周期也在 2% 以上。但在开启气液分离器后，失效周期和扰动周期都会明显减小，说明气液分离器在控制泵回路气相分数和泵驱动效能方面还是具有一定的作用。

(2) 在开启和关闭气液分离器后，气液分离器的出口压力并无明显下降，说明气液分离器

的阻力压降极小，同时改善泵的驱动性能也能略微提高泵的扬程。这一点与气液分离器的阻力压降模拟结果较好吻合。

同时对是否开启气液分离器时回路中的质量流量以及换热效率进行了测试 (结果见表 6)。可以看出，气液分离器的开启与否对于泵后方流体驱动和换热的影响极小。由于在分离器后方没有安装气体收集装置，仅能在泵后方调节压力波动；分离的气相组分在有限体积的分离器中重新积聚，依然进入后方的换热回路中，从而影响换热性能。

表 6 不同工况下的驱动质量流量及换热测试结果

	加热功率 (W/cm ²)	控制电压 (V)	质量流量		体积流量 (mL/s)	底板温度 T_i (°C)	
			(kg/h)	(g/s)		T_1 (max)	T_4 (min)
关闭气液分离器	5	1.7	49.20	13.67	8.99	45.7	34.5
		2.4	52.40	14.56	9.58	44.5	33.6
开启气液分离器	5	1.7	50.3	13.97	9.19	45.4	33.3
		2.4	53.5	14.86	9.78	44.4	33.6

3 结束语

根据多孔介质中两相流体的流动特性,设计了一种基于阻力的可在零重力下实现气液两相分离的流体装置,总结了该装置的工作机理并对其进行了数学建模计算和流体仿真模拟。在流体测试试验台中验证了该装置可改善泵驱动特性的优点,并测试了其回路流体传输性能和换热性能的影响。结果表明,气液分离器对于改善泵的驱动压力特性具有较好效果,但由于没有安装气相组分收集装置,未能明显观察到气液分离装置对改善泵流体驱动性能及换热性能的作用。因此,我们在下一步工作中需要对气相组分收集装置进行设计。

参考文献

- [1] Antipin V. The Development of a Three-Fluid Model of Two-Phase Flow for Dispersed-Annular Mode of

Flow in Channels-Film Thickness and Pressure Drop [J]. *Heat and Mass Transfer and Physical Gas Dynamics (High Temperature)*, 2003, **41**(3): 399-403.

- [2] Nagdewe S, Kwoon J K. A Parametric Study for High-Efficiency Gas-Liquid Separator Design [J]. *Journal of Thermal Science*, 2008, **17**(3): 238-242.
- [3] Salant R F. Gas-Liquid Separator: US843019 [P]. 1982-05-18.
- [4] Sakai-shi S, Sakai-shi T. Gas-Liquid Separator and Refrigeration Device with the Gas-Liquid Separator: EP1975526 [P]. 2008-10-01.
- [5] Bruun T. Gas-Liquid Separator: US8894755 [P]. 2014-11-25.
- [6] 邹俊, 王陈向, 傅新. 液压油在线除气装置设计与试验 [J]. *液压气动与密封*, 2012, **32**(8): 53-55.
- [7] Barron R. Cryogenic Heat Transfer (Second Edition) [M]. Oxford: Taylor & Francis Group, 2016.
- [8] Larkins R P, White R R. Two-Phase Co-Current Flow in Packed Beds [J]. *Aiche Journal*, 1961, **7**(2): 231-239.

(上接第 19 页)

参考文献

- [26] 储琨, 施芒, 符祥. 基于光流的动态背景运动目标检测算法 [J]. *南昌航空大学学报 (自然科学版)*, 2011, **25**(3): 1-6.
- [27] 周正杰. 基于形状的目标识别方法研究 [D]. 国防科学技术大学, 2005.
- [28] 黄凯奇, 陈晓棠, 康运锋, 等. 智能视频监控技术综述 [J]. *计算机学报*, 2015(6): 1093-1118.
- [29] 夏瑜. 视觉跟踪新方法及其应用研究 [D]. 江南大学, 2013.
- [30] 谭天. 基于轨迹的监控视频检索的研究 [D]. 杭州电子科技大学, 2013.
- [31] 梁燕. SVM 分类器的扩展及其应用研究 [D]. 湖南大学, 2008.
- [32] 陈沅涛. 图像视觉显著性和改进型 SVM 在图像分割中的研究 [D]. 南京理工大学, 2014.

- [33] 安金龙. 支持向量机若干问题的研究 [D]. 天津大学, 2004.
- [34] 王宪, 柳絮青, 宋书林, 等. 一种无监督学习的异常行为检测方法 [J]. *光电工程*, 2014(3): 43-48.
- [35] 崔永艳, 高阳. 基于多示例学习的异常行为检测方法 [J]. *模式识别与人工智能*, 2011, **24**(6): 862-868.
- [36] 钟志. 基于异常行为辨识的智能监控技术研究 [D]. 上海交通大学, 2008.
- [37] 范五东. 动态背景下的多目标检测与跟踪的研究 [D]. 重庆大学, 2012.
- [38] 钱惟贤. 复杂背景下红外小目标探测与跟踪若干关键技术研究 [D]. 南京理工大学, 2010.
- [39] 汪大宝. 复杂背景下的红外弱小目标检测与跟踪技术研究 [D]. 西安电子科技大学, 2010.
- [40] 孔令磊. 高帧频红外目标检测跟踪算法的研究与实现 [D]. 电子科技大学, 2010.