

文章编号: 1672-8785(2017)04-0023-05

# 机械泵驱动两相流系统中被动截止阀的特性研究

何慧翔<sup>1,2</sup> 吴亦农<sup>1,2</sup> 谢荣建<sup>1</sup>

(1. 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083;

2. 上海科技大学, 上海 201210)

**摘 要:** 设计了一种用于机械泵驱动两相流系统的新型被动截止阀。对设计的膜片式被动截止阀进行了 ANSYS 静态结构分析和过流特性仿真。对该截止阀的正向过流和反向截流的性能进行了实验测试。结果显示, 截止阀的各项性能完全能够满足机械泵的要求。设计的截止阀对机械泵流体输出性能提高的研究具有参考意义。

**关键词:** 机械泵; 被动截止阀; 膜片阀

**中图分类号:** TB6 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2017.04.005

## Study of Properties of Passive Check Valve in MPCL

HE Hui-xiang<sup>1,2</sup>, WU Yi-nong<sup>1,2</sup>, XIE Rong-jian<sup>1</sup>

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

2. Shanghai University of Science and Technology, Shanghai 201210, China)

**Abstract:** A new passive check valve for Mechanical Pumped Cooling Loops (MPCL) is designed. Static structural analysis and flow characteristic simulation of the diaphragm-type passive check valve designed are performed by the software ANSYS. The forward flow and leak flow characteristics of the check valve are tested experimentally. The results show that the performance of the check valve can completely meet the requirements of the mechanical pump. The check valve is of referential significance to the research on the improvement of the performance of mechanical pumps.

**Key words:** mechanical pump; passive check valve; diaphragm valve

## 0 引言

随着航天器的规模和功能不断扩展, 空间技术向大功率、长寿命以及多用途空间平台的方向发展。在研究一些体积小、质量轻、成本低、研制周期短的小型探测器时, 其内部电子装置的复杂程度不断增加。高性能的电子器件往往意味着高功率以及低工作温度, 这会导致其发热量急剧增加, 而其紧凑的结构特点又会导致

其热流密度急剧增加。由于航天器内外部特殊环境条件的限制, 航天器载荷的冷却十分困难。当航天器携带的仪器设备的整体或者局部温度升高到工作温度区间以外时, 若散热措施达不到工作要求, 其器件将无法正常工作甚至会被损坏。

因此, 亟需研究一种高效而可靠的航天器热控技术。近年来, 由于航天器上元器件的

**收稿日期:** 2017-02-15

**作者简介:** 何慧翔(1991-), 男, 浙江义乌人, 硕士研究生, 主要从事机械泵驱动两相流回路系统中被动截止阀的研究。E-mail: hehx@shanghaitech.edu.cn

集成化程度不断提高,装置的热流密度不断上升。在众多的散热手段中,两相流循环冷却技术发展迅速<sup>[1]</sup>。事实证明,这是一种最有效的散热方式。目前两相流环路系统的驱动力主要来自毛细力,整个系统无需机械运动部件,因此系统的能耗大大降低。然而受毛细力大小和稳定性的影响,当空间设备散热回路复杂度高、热控任务的可控性要求高时,该系统的散热效果不理想。因此,一种新型的主动式热控系统——机械泵驱动两相流冷却环路系统<sup>[2]</sup>(Mechanically Pumped Cooling Loop, MPCL)逐渐成为航天热控技术研究的热点。该系统通过机械泵提供驱动力,传输能力比毛细力驱动高几个数量级。这为高热流密度和高控温精度的复杂回路散热提供了可能<sup>[3]</sup>。

本文所设计的被动截止阀将被用于机械泵中。该泵要求阀片的开启压力小于 1000 Pa。正常工作状态下,泵的输出流量为 1 ml/s,其工作压力应小于 10000 Pa。本文按照机械泵的工作条件设计了一种新型被动式截止阀。阀片材料选用山特维克公司生产的 7C27Mo2 弹簧不锈钢。对设计的阀片进行了静态结构分析以及过流特性仿真。最后通过实验检验了其实际应用性能。

## 1 机械泵用被动截止阀的设计

为了提升机械泵的流体输出性能,被动截止阀的设计应考虑三个主要因素:阀片的响应特性、阀片的临界开启压力以及阀片的开启度。首先是阀片的响应特性。机械泵内部的振子振动会带动泵腔容积的变化。当泵腔的容积变大时,流体进口处的截止阀打开,流体出口处的截止阀关闭;泵腔容积变小时,流体进出口处截止阀的开关状态与之相反。因此,截止阀与机械泵之间存在一个相位差。机械泵的工作频率在 50 Hz 左右,而如果想让阀片较好地响应机械泵的工作,阀片的固有频率应当在 500 Hz 以上。其次是阀片的临界开启压力。由于阀片本身并不是零工作阻力,只有当阀片进出口压差达到一定值时,阀片才会开启工作,这个压力值就是阀片的

临界开启压力。临界压力越小,阀片就越容易打开,阀片相对于泵的“滞后性”就越小,泵的性能就越好。最后是阀片的开启度。在相同的压差作用下,阀片的开启度越大,流经阀门的流量越大,泵的输出能力就越强<sup>[4]</sup>。

基于以上三方面的因素,设计了如图 1 所示的膜片式截止阀。



图 1 膜片式截止阀

阀片的一条阀臂由两条圆渐开线封闭构成,通过圆周阵列得到另外两条阀臂。以阀片中心为原点,建立坐标系,可得到圆的渐开线方程为

$$\begin{cases} x = r(\cos \varphi + \varphi \sin \varphi) \\ y = r(\sin \varphi - \varphi \cos \varphi) \end{cases} \quad (1)$$

式中, $r$ 是基圆半径, $\varphi$ 是圆渐开线的渐开角。这里取基圆半径为 1 mm。

## 2 阀片的静态结构分析

有限元分析方法是进行阀片静态结构分析最有效的方法<sup>[5]</sup>。本研究所设计的阀片的外圆半径为 7.5 mm,内部圆盘的半径为 3 mm,阀臂的宽度为 0.5 mm,基圆半径为 1 mm,阀片的厚度为 0.2 mm。有限元分析过程可以大致分为前处理阶段、求解器求解阶段和后处理阶段三个阶段。

### 2.1 前处理阶段

此阶段包括建立模型、修改模型、给定材料特性和划分网格。使用 Solidworks 三维建模软件建立阀片模型,将其保存为 x.t 格式文件,再将其导入 ANSYS 有限元分析软件。在 ANSYS 自带的 DM 模块中对模型进行修改,去除一些不影

响分析结果的细节,同时添加一些后续将施加边界条件的面印记。将阀片材料设置为弹簧不锈钢,材料密度为  $7750 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ,杨氏模量为  $193 \text{ GPa}$ ,泊松比为  $0.3$ 。网格为自由网格划分,网格大小为 Medium。

## 2.2 求解器求解阶段

设置阀片外圆上所有表面的边界条件为固定约束。在内部圆盘上施加不同大小的压力,求解阀片的应力分布、变形量以及一阶频率。

## 2.3 后处理阶段

在后处理阶段,通过 ANSYS 的自带功能输出计算结果的云图。图 2 为向阀片中心圆盘施加  $10000 \text{ Pa}$  压力时阀片应力的分布云图。最大应力出现在阀臂末端槽处,最大应力为  $101.65 \text{ MPa}$ 。根据山特维克公司发布的  $7\text{C}27\text{Mo}2$  不锈钢材料的力学性能,疲劳强度失效率为  $5\%$  时其许用循环应力为  $\pm 710 \text{ MPa}$ 。可以发现,即使向阀片中心施加机械泵的最大工作压力  $10000 \text{ Pa}$ ,阀片的最大应力也只有  $101.65 \text{ MPa}$ ,远小于  $7\text{C}27\text{Mo}2$  不锈钢材料的许用循环应力  $710 \text{ MPa}$ ,因此阀片工作在机械泵中时不存在疲劳失效的风险。图 3 为向阀片中心圆盘施加  $10000 \text{ Pa}$  压力时阀片变形量的分布云图,变形量的最大值出现在阀片的中心圆盘处,移动了  $0.15664 \text{ mm}$ 。受泵腔容积限制,只要阀片中心圆盘的移动量小于  $0.5 \text{ mm}$ ,我们都认为是合理的。图 4 为阀片的一阶模态振型,其一阶固有频率为  $734.1 \text{ Hz}$ ,我们设计的要求是一阶固有频率大于  $500 \text{ Hz}$ ,因此阀片的频率也满足机械泵的工作要求。

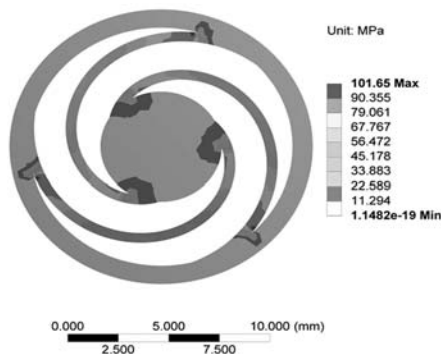


图 2 阀片应力的分布云图

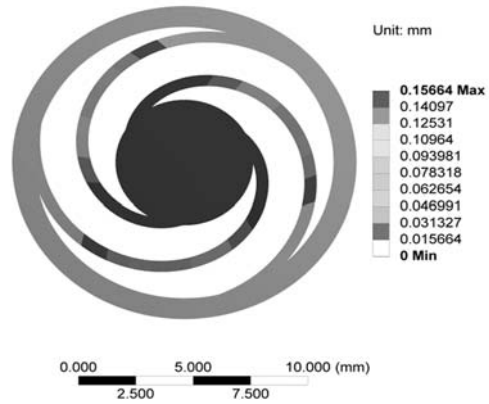


图 3 阀片变形量的分布云图

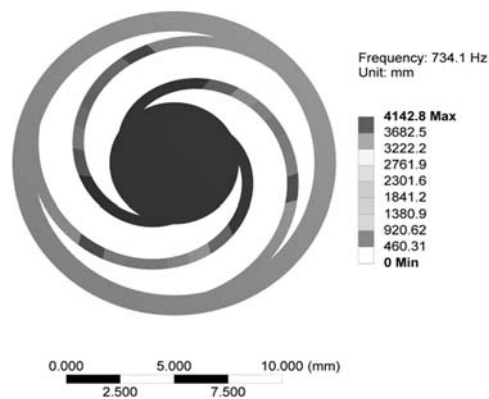


图 4 阀片的一阶模态振型

## 3 阀片的过流特性仿真

为了测试阀片的过流特性,需要设计一套阀门装置来进行 Fluent 仿真与真实实验。首先需要对阀门组件的内部流道进行提取建模。由于阀片结构较复杂,建模难度大,因此将其简化,简化后的阀片的过流特性测试装置如图 5 所示。以  $1000 \text{ Pa}$  压力为例,先通过 ANSYS 静态结构分析,计算  $1000 \text{ Pa}$  压力下阀片中心圆盘的位移量;在构建流道模型时,按照计算得到的数值给定中心圆盘的位置。由于阀臂的位置基本不影响流体流动,因此可以忽略阀臂,减少计算量。进行 Fluent 计算时,将模型入口和出口表面的边界条件设置为压力条件,将其它所有表面都设置为流体的边界层,采用  $k\text{-}\omega$  湍流模型进行计算。为了保证出入口边界条件与真实实验相一致,将出口压力设置为大气压力  $P_0=101325 \text{ Pa}$ ,将入口压力设置为  $P_0+1000 \text{ Pa}$ 。

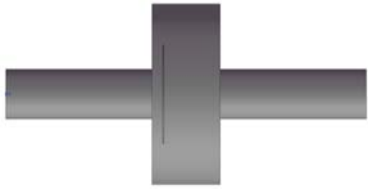


图5 阀片过流特性的计算模型

计算完成后, 通过 Report 输出阀门的出口流量。当入口出口压力差为 1000 Pa 时, 阀门出口流量为 0.72 mL/s。每隔 500 Pa 的压力差, 重复以上步骤, 得到若干不同压力差下的阀门出口流量。图 6 是拟合的阀门出口体积流量与阀门进出口压力差的关系曲线。从图中可以看到, 阀门出口体积流量与阀门进出口压差成一定比例的线性关系。这是因为刚度是弹簧不锈钢的一种性能参数, 阀片中心圆盘的位移量与其受到的压力成线性关系, 而阀片中心圆盘的位移量会直接影响流量的大小。

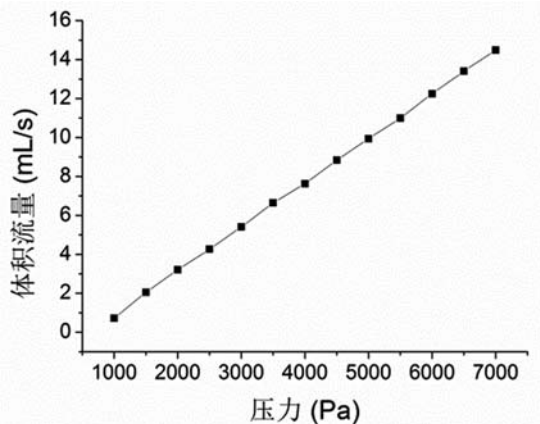


图6 过流特性的仿真结果曲线

#### 4 阀片性能的实验测试

实验主要测试阀片三方面的性能。

一是阀片的开启压力。由于不是理想状态, 阀片内部存在工作阻力。只有当阀片进出口压差达到一定值时, 阀片才会开启进行工作, 我们的设计 requirements 是阀片开启压力小于 1000 Pa。采用图 7 所示的实验装置进行阀片开启压力的测试。将阀片安装在阀门组件中, 在阀门组件进出口处分别安装压力传感器以测量进出口处的压力。

在阀门出口处, 有体积流量计测量阀门的出口流量, 通过改变液面高度可以改变阀门进口处的压力。从零开始不断增加液面高度, 观察阀门出口处的流量状态。当阀门出口处恰好有流体流出时, 我们认为阀片恰好开启了, 此时由进出口压力传感器测得的压力差就是阀片的临界开启压力。经过多次实验发现, 阀片的临界开启压力为 891.8 Pa, 符合小于 1000 Pa 的设计要求。

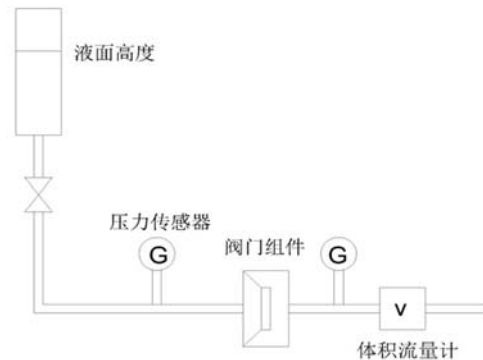


图7 阀片性能的测试装置

二是阀片的过流特性。当阀门内部流体正向流动时, 不同的压力差对应不同的输出流量。当阀门进出口压力差为 1000 Pa 时, 测得的阀门出口流量为 0.85 mL/s, 这与仿真结果相当接近。根据实验结果, 拟合了图 8 所示的流量与压差关系曲线。与仿真结果一样, 阀门出口流量正比于阀门进出口压力差。

三是阀片的截流特性。此时阀片出口处的压力大于阀片进口处的压力, 即阀门内部流体反向流动, 测量阀门进口处泄漏流量与阀门出口进口压力差之间的关系。将阀门组件的进出口互换方向安装在实验装置中进行实验。实验结果拟合了图 9 所示的阀门进口处泄漏流量与阀门出口进口压力差的关系曲线。从该曲线可以看出, 当压力差逐渐增大时, 阀门进口处泄漏流量呈现先增大后减小的态势。这是由于加工工艺、安装装配等限制条件, 阀片表面与阀门底座之间在初始状态下存在一定的缝隙, 这些缝隙是导致泄漏流量的主要因素<sup>[6]</sup>。当压力小于一定值时, 阀门进口处的泄漏流量与压力差保持正向比例关系; 当压力逐渐增大到超过一定值后, 阀片表面与阀门底座之间的缝隙越来越小, 导致



阀门进口处的泄漏流量与压力差保持反向比例关系。

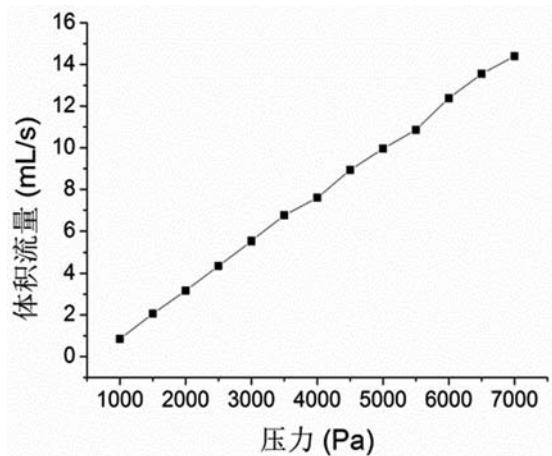


图 8 过流特性实验结果曲线

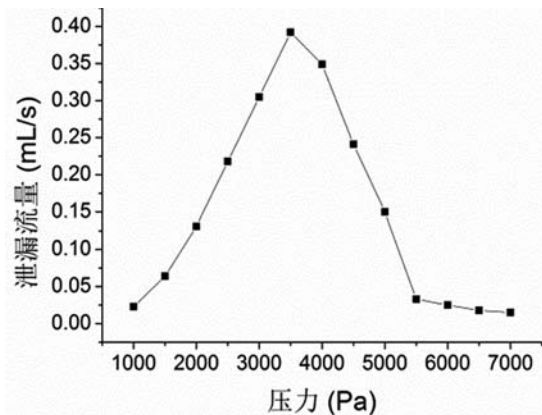


图 9 截流特性实验结果曲线

## 5 结论

根据机械泵的工作条件给出了一种新型被

动截止阀的设计指标, 按照指标设计了一款膜片式的被动截止阀。对阀片进行了 ANSYS 静态结构分析、过流特性仿真以及实验测试。根据分析实验和仿真的结果, 可以得出以下结论:

(1) 本文所设计的被动截止阀适用于机械泵的工作, 其各项指标都满足了设计要求。

(2) 阀门内部流体正向流动时, 阀门的出口流量正比于进出口压差; 阀门内部流体反向流动时, 阀门的进口泄漏流量随着压差的增大呈现先增后减态势。

(3) 本文对新型被动截止阀的设计, 可为机械泵流体输出能力提高的后续研究提供参考。

## 参考文献

- [1] 刘杰. 航天机械泵驱动两相流冷却环路循环特性的研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2008.
- [2] 闵桂荣, 郭舜. 航天器热控制 (第二版) [M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [3] 范含林. 载人航天器热管理技术发展综述 [J]. 航天器工程, 2007, 16(1): 28-32.
- [4] 张丛春, 郭泰, 丁桂甫. 基于 SU-8 胶的新型被动式微型阀 [J]. 光学精密工程, 2013, 21(4): 1012-1016.
- [5] Chen N, Chen X, Wu Y N, et al. Spiral Profile Design and Parameter Analysis of Flexure Spring [J]. Cryogenics, 2006, 46(6): 409-419.
- [6] Veenstra T T, Venhorst G C F, Burger J F, et al. Development of a Stainless Steel Check Valve for Cryogenic Applications [J]. Cryogenics, 2007, 47: 121-126.
- [7] 汪哲能, 邱锡荣, 杨博伟. 电铸液中钴含量对镍钴合金电铸模芯性能的影响 [J]. 材料保护, 2016, 49(1): 59-62.
- [8] 裴和中. 镍钴合金电铸成形精密器件应用与机理的研究 [D]. 昆明: 昆明理工大学, 2013.
- [9] 裴和中, 李雪, 黄攀, 等. 镍钴合金电铸精密薄壁件的研究现状及展望 [J]. 热加工工艺, 2013, 42(21): 13-15.

(上接第 5 页)

- [10] Khor K A, Cheng K H, Yu L G, et al. Thermal Conductivity and Dielectric Constant of Spark Nitride [J]. Mater Sci Eng A, 2003, 347(1/2): 300-305.
- [11] Michael Singer. Design of a Cryogenic IR Detector with Integrated Optics [C]. SPIE, 2010, 7660: 76601Z.