文章编号:1001-2060(2025)05-0032-09

# 电机定子热功耗对离心泵空化特性的影响

曹子睿1,刘锦涛2,罗 磊1,闫 晗1

(1. 哈尔滨工业大学 能源科学与工程学院,黑龙江 哈尔滨 150001;

2. 北京控制工程研究所 北京市高效能及绿色宇航推进工程技术研究中心,北京 100094)

摘 要:为研究电机定子热功耗对以全氟三乙胺为工质的空间离心微泵空化性能的影响,本文基于 Z-G-B 空化模型,首先对比了不同空化数下考虑热效应与不考虑热效应的数值计算结果,并在工质物性随温度变化的基础上,探究了不同电机定子热功耗输入对离心微泵空化特性的影响。结果表明:热效应会显著抑制空化的发展,其影响不可以忽略;在考虑热效应的基础上,离心微泵空化特性受冷却回路结构限制,并没有随着热源输入的增大而发生明显变化。

关键 词:空间离心微泵;空化;热效应;电机热功耗;数值模拟

中图分类号:TH311 文献标识码:A DOI:10.16146/j. cnki. rndlgc. 2025.05.004

[**引用本文格式**]曹子睿,刘锦涛,罗 磊,等. 电机定子热功耗对离心泵空化特性的影响[J]. 热能动力工程,2025,40(5):32-40. CAO Zirui, LIU Jintao, LUO Lei, et al. Influence of motor stator thermal power consumption on cavitation characteristics of centrifugal pumps [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power,2025,40(5):32-40.

# Influence of Motor Stator Thermal Power Consumption on Cavitation Characteristics of Centrifugal Pumps

CAO Zirui<sup>1</sup>, LIU Jintao<sup>2</sup>, LUO Lei<sup>1</sup>, YAN Han<sup>1</sup>

(1. School of Energy Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001;
2. Beijing Engineering Research Center of Efficient and Green Aerospace Propulsion Technology,

Beijing Institute of Control Engineering, Beijing, China, Post Code: 100094)

**Abstract**: To investigate the influence of motor stator thermal power consumption on the cavitation performance of a spatial centrifugal micropump using perfluorotriethylamine as the working fluid, this paper employd the Z-G-B cavitation model. Initially, a comparison between the numerical calculation results considering thermal effect and those not considering thermal effect under different cavitation numbers was conducted. On the basis of the variation of the working fluid's physical properties with temperature, the impact of different inputs of motor stator thermal power consumption on the cavitation characteristics of the centrifugal micropump was explored. The results indicate that thermal effect significantly suppresses the development of cavitation, and such effect cannot be neglected; on the basis of considering thermal effect, the cavitation characteristics of the centrifugal micropump are constrained by the cooling circuit structure and do not exhibit noticeable changes with the increase of heat source input.

Key words: spatial centrifugal micropump, cavitation, thermal effect, motor thermal power consumption, numerical simulation

收稿日期:2024-08-22; 修订日期:2025-01-11

基金项目:黑龙江省优秀青年基金(YQ2021E023)

Fund-supported Project: Natural Science Fund for Excellent Young Scholars of Heilongjiang Province (YQ2021E023)

作者简介:曹子睿(2001 - ),男,哈尔滨工业大学硕士生.

通信作者:罗 磊(1987 -),男,哈尔滨工业大学教授.

## 引 言

目前,液体推进剂作为我国绝大多数空间推进 系统主要原料,是卫星在轨运行的关键。推进剂在 轨加注技术是利用空间微泵在轨加注推进剂来延长 卫星寿命,提高卫星价值<sup>[1]</sup>。空间微泵作为其中的 关键部件之一,提高其运行的稳定性以保证推进剂 的安全加注具有十分重要的工程意义。

空间微泵是应用在航空航天领域的微型泵,体 积较小,直径在1~50 mm之间,需要在小流量工况 下实现高扬程输送。空间微泵工作时压力普遍较 低,这导致微泵中容易产生空化,对泵的水利性能会 产生影响。因此,控制微泵在工作状态时的空化程 度是空天工程中亟待解决的问题。在发生空化时, 汽化潜热会使空间微泵局部温度降低,由于空间微 泵工质物性参数对温度变化较为敏感,温降对工质 饱和蒸气压的影响不可忽略。针对离心泵空化热效 应的影响,国内外学者开展大量研究。Moore 等 人<sup>[2]</sup>研究了不同热敏性流体在泵中的空化特性,并 根据实验结果得到了温度和饱和蒸气压力变化曲线 的斜率,首次进行了温度对空化特性影响的定量分 析,并对预测空化程度的可行性进行了分析。时素 果等人[3] 搭建了水翼实验平台,研究了热效应对空 化水动力脉动特性的影响,得到了不同水温下的非 定常空化流动特性。曹潇丽<sup>[4]</sup>设计搭建了低温流 体在文丘里管中流动的可视化实验平台,赵东方等 人[5]则在此基础上搭建了一套低温流体空化流动 实验观测装置,并利用该装置获得了液氮在文丘里 管中呈周期性脱落的空化云图。Hosangadi 等人<sup>[6]</sup> 探究了 Merkle 空化模型对低温流体的适用性,将液 氮和液氢的实验结果与数值仿真计算结果进行对比 分析发现,低温流体的经验系数应小于水空化模型 的经验系数。季斌等人<sup>[7]</sup>对 Singhal 空化模型进行 了修正,将采用修正后模型计算得到的不同温度水 的物面负压系数仿真结果与实验结果进行对比分析 发现,修正空化模型的计算结果与实验结果更贴近。 Huang 等人<sup>[8]</sup>修正了热力学空化模型,并利用其对 液氢进行了数值模拟,计算结果同样与实验结果很 好地吻合。Yu 等人<sup>[9]</sup>采用熵产法对热敏性流体在 水翼中的空化流动进行了研究分析,得到了熵产率 在非定常空化流动中的动态分布。魏爱博<sup>[10]</sup>开展 了液氮潜液泵低温测试实验和诱导轮 - 叶轮全流 场动态数值计算,分析了液氮潜液泵外特性和非稳 态空化流动特征,揭示了空化对液氮潜液泵的影响 机理。马静雯等人<sup>[11]</sup>基于不同影响因素将考虑热 效应的空化流动分为高温壁面空化、高温通气空 泡、高温水空化以及低温热敏流体空化,并分别综 述了4类情况下的空泡演化特性和影响规律,为相 关领域的工程设计和优化提供了理论基础和实验 依据。

在离心泵运行过程中,电机定子产生的热功耗 也会影响流经电机冷却回路工质的物性参数,这将 导致加注泵内的空化流动情况更为复杂。国内外对 于这方面的研究仍十分稀缺,因此本文基于 Zwart-Gerber-Belamri(ZGB)空化模型,对以全氟三乙胺为 工质的空间离心微泵进行了空化数值模拟,探究了 工质物性对离心微泵空化特性的影响,通过改变电 机定子热功率,分析了不同热功率输入下离心微泵 内的空化流动特性。

# 1 数值计算

#### 1.1 空化计算模型

本研究采用基于 Rayleigh-Plesset(R-P)方程提 出的 Zwart-Gerber-Belamri(ZGB)空化模型对以全氟 三乙胺为工质的空间离心泵进行了空化数值模拟, R-P方程具体形式如下:

$$R_{\rm B} \frac{{\rm d}^2 R_{\rm B}}{{\rm d}t^2} + \frac{3}{2} \left(\frac{{\rm d}R_{\rm B}}{{\rm d}t}\right)^2 + \frac{2S}{R_{\rm B}} = \frac{p_{\nu}(T_{\infty}) - p_{\infty}}{\rho_1} (1)$$

式中: $R_{\rm B}$ —空泡的直径; $p_{\nu}(T_{\infty})$ —无穷远处热力学 状态下的饱和蒸气压; $p_{\infty}$ —空化区外部的液相压 强;S—两相之间的张力系数; $\rho_1$ —液相密度。

假设方程中的  $R_{\rm B}(d^2R_{\rm B})/dt^2$ 项和表面张力项 2 $S/R_{\rm B}$ 可以忽略,该方程可以简化为:

$$\frac{3}{2} \left(\frac{dR_{\rm B}}{dt}\right)^2 = \frac{p_{\nu}(T_{\infty}) - p_{\infty}}{\rho_1}$$
(2)

由此可以得到气泡的体积变化率和质量变化率 如下:

$$\frac{\mathrm{d}V_{\mathrm{B}}}{\mathrm{d}t} = \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t} \left(\frac{4}{3}\pi R_{\mathrm{B}}^{3}\right) = 4\pi R_{\mathrm{B}}^{2} \frac{\mathrm{d}R_{\mathrm{B}}}{\mathrm{d}t}$$
(3)

$$\frac{\mathrm{d}m_{\mathrm{B}}}{\mathrm{d}t} = \rho_{\nu} \frac{\mathrm{d}V_{\mathrm{B}}}{\mathrm{d}t} = 4\pi R_{\mathrm{B}}^2 \rho_{\nu} \frac{\mathrm{d}R_{\mathrm{B}}}{\mathrm{d}t}$$
(4)

式中: $V_{\rm B}$ —气泡体积; $m_{\rm B}$ —气泡质量; $\rho_{\nu}$ —流体介质 在此温度下的饱和蒸汽压力。

单位体积气泡数 N<sub>B</sub>可表示为:

$$N_{\rm B} = \frac{\alpha_{\nu}}{V_{\rm B}} = \frac{3 \, \alpha_{\nu}}{4\pi \, R_{\rm B}^3} \tag{5}$$

式中: α, 一气相体积分数。

则每单位的相间质量传输率 m<sub>fg</sub>可表示为:

$$m_{\rm fg} = N_{\rm B} \frac{{\rm d}m_{\rm B}}{{\rm d}t} = \frac{3\alpha_{\nu}\rho_{\nu}}{R_{\rm B}} \frac{{\rm d}R_{\rm B}}{{\rm d}t}$$
$$= \frac{3\alpha_{\nu}\rho_{\nu}}{R_{\rm B}} \sqrt{\frac{2}{3}\frac{p_{\nu}(T_{\infty}) - p_{\infty}}{\rho_{\rm I}}}$$
(6)

最终得到蒸发源项  $m^+$ 和凝结源项  $m^-$ 的表达 式如下:

$$m^{+} = C_{vap} \frac{3\alpha_{nuc} (1 - \alpha_{v})\rho_{v}}{R_{B}} \sqrt{\frac{2}{3} \frac{(p_{v} - p)}{\rho_{1}}}; p \leq p_{v} (7)$$
$$m^{-} = C_{cond} \frac{3\alpha_{v} \rho_{v}}{R_{B}} \sqrt{\frac{2}{3} \frac{(p - p_{v})}{\rho_{1}}}, p_{v}$$

式中: $R_{\rm B} = 1 \times 10^{-6} \,\mathrm{m}$ ; $\alpha_{\rm nuc}$ —非凝结气体体积分数, 取  $5 \times 10^{-4} C_{\rm vap}$ 和  $C_{\rm cond}$ —蒸发和凝结源项常数,依空 化模型分别取 50 和 0.01。

#### 1.2 多相流模型

a

本文所研究微型离心泵适用于卫星在轨加注系统,在微重力情况下,表面张力的影响不可忽略,因此选用 VOF 多相流模型进行计算。VOF 模型建立 在两种及以上流体不混合的前提下,能够通过跟踪 相界面,揭示表面张力的影响。Navier-Stokes (N-S)方程描述为:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \boldsymbol{u} \cdot \nabla \phi = 0 \tag{9}$$

$$\frac{\partial(\rho_{\rm m}u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_{\rm m}u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + -\left[\left(\begin{array}{c} & & \\ & & \\ & & \\ \end{array}\right)\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \frac{\partial u_j}{\partial x_j}\right)\right] + S \kappa \delta(d) n \qquad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \mu_i \right) \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + S\kappa \delta(d) \ n_i \tag{10}$$

式中: $\phi$  —体积分数函数;u—速度矢量; $\rho_m$ —混合密度; $u_i, u_j$ —速度矢量u 在笛卡尔坐标系i, j 方向上的分量; $x_i, x_j$ —笛卡尔坐标系中的坐标变量,分别代表x, y 方向;p—流体内部压力; $\mu$ —动力粘度; $\mu_i$ —湍流粘度; $S\kappa\delta(d)n_i$ —集中在相界面上的表面张力;S—表面张力系数; $\kappa$ —相界面的曲率;d—计算区域中的点与相界面的垂直距离;n—相界面上法向朝

外的单位向量; $\delta$ —狄拉克 $\delta$ 函数。

在计算时,VOF 模型中附加的表面张力变化用 表面张力系数 S 表示,本研究中所用介质全氟三乙胺 的表面张力系数为 0.012 7 N/m<sup>[13]</sup>。文献[13 – 15] 研究表明,液滴浸润角与邦德数大小有直接关系,且 接触角也受到重力影响。文献[16]实验表明,微重 力下浸润角小于常重力下的浸润角约 10°~20°。 因此,本文将浸润角修正为 80°。

## 1.3 参数定义

空化数 $\sigma$ 定义为:

$$\sigma = \frac{p_{\rm in} - p_v}{\frac{1}{2} \rho U^2} \tag{11}$$

式中:*p*<sub>in</sub>—远场静压值(本文中为空间微泵入口压 力值,Pa);*p*<sub>v</sub>—全氟三乙胺的饱和蒸汽压,293 K 时 为16 880 Pa; *p*—全氟三乙胺密度,293 K 时为1 733 kg/m<sup>3</sup>; *U*—流体参考速度,本文中取转轮叶片外缘 的线速度,9.215 m/s。

# 2 计算模型与方法

#### 2.1 计算模型

本文所研究离心微泵的基本设计参数为:流量 70 L/h,额定扬程4.4 m,转速8 000 r/min。几何模 型如图1 所示。主要计算域有入口段、叶轮、蜗壳及 电机冷却回路,流体域及工质在离心泵内流动方向 如图2 所示,图中箭头表示工质在回路内的流动 方向。



图1 离心微泵几何模型





图 2 流体域示意图 Fig. 2 Schematic diagram of fluid domain

#### • 35 ·

#### 2.2 网格划分与边界条件

# 2.2.1 网格划分与无关性验证

采用 Star CCM 软件生成计算用的多面体非结构化网格,边界层总厚度为 5×10<sup>-5</sup> m,各流域网格如图 3 所示。考虑到计算资源和精度问题,基于空间微泵模型划分了 171 万、197 万、315 万、420 万、530 万及 625 万共 6 套不同网格数量的方案。在额定工况下进行定常计算,以扬程为检验标准,给定进口质量流量 Q = 0.033 7 kg/s、出口静压为 0.1 MPa、转速为 8 000 r/min。采用 SST  $k - \omega$  湍流模型进行网格无关性验证,结果如图 4 所示。由图 4 可知,计算所得扬程值随网格数增加呈现下降趋势,当节点数高于 315 万时,计算所得扬程基本不再变化,且扬程 H 与通过额定压头计算所得扬程(4.406 m)相对误差均在 2% 以内。考虑到计算准确性,并且为了节约计算资源,选取网格数为 420 万的网格方案进行后续计算分析。



图 3 空间微泵流体域网格图 Fig. 3 Mesh diagram of fluid domain in centrifugal micropump





# 2.2.2 边界条件

采用商业软件 ANSYS Fluent 进行数值计算,湍 流模型选用 SST  $k - \omega^{[16]}$ 模型,多相流模型选用 VOF 模型,空化模型选用 Zwart-Gerber-Belamri (ZGB)模型,表面张力模型设置为连续表面力模型, 表面张力系数设置为 0. 012 7 N/m,壁面接触角修 正为 80°。空间微泵边界条件设置如下:转轮与转 轴设置为旋转域,转速为 8 000 r/min,其余流域设 置为静止域;参考压力为 0 Pa,进、出口分别设置为 质量流量入口和压力出口,入口温度为 293 K,出口 压力值分别为 0. 102 、0. 103 、0. 104 、0. 105 、0. 106 和 0. 11 MPa,对应空化数  $\sigma$ 分别为 0. 12 、0. 13 、0. 15、 0. 16、0. 18 和 0. 23;所有固体壁面均为无滑移壁面; 数值计算选用了 Coupled 算法,连续性方程、动量方 程和能量方程的残差收敛标准为 1 × 10<sup>-6</sup>。

# 3 计算结果与分析

#### 3.1 定物性空化数值计算

定物性空化数值计算对于离心泵空化特性的研 究主要是在工质物性不变的工况下进行,忽略热效应 的影响。不同空化数下,使用恒定物性工质(293 K) 在额定工况下计算所得的扬程曲线如图 5 所示。从 图中可以看出,随着空化数的减小,扬程相应数值也 逐渐减小,当空化数从 0.16 继续下降时,扬程下降 趋势加剧。在当前空化范围内计算时,扬程与空化 数表现为正相关。



图 5 定物性下空间微泵外特性曲线

Fig. 5 External characteristic curve of spatial micropump under constant physical properties

为进一步了解定物性工况下空间微泵内空化性 能,对转轮吸力面全氟三乙胺蒸汽体积分数为0.5 的等值界面进行分析,结果如图6所示。一般认为 气相体积分数高于 0.5 的区域空化现象较为明显. 从图中可以看出,当空化数较大,即入口压力较高 时,仅在叶轮进口叶片前缘压力面靠近叶根附近产 生空化:随着空化数的不断减小,叶轮流道内的空泡 开始沿压力面向下游延伸,当空化数达到0.15时, 泵内空化发展到一定规模,空泡不仅进一步向叶轮 出口扩张,同时向流道中间扩散,发展为云状。虽然 空泡在每个相邻长叶片之间发展规律不同,但基本 占据流道入口近50%区域,对进口区域的流动形成 影响,在一定程度上堵塞了部分流道,影响了叶轮在 此区域的能量转换效率,这种情况在泵能量特性上 表现为扬程下降,这与图5中空化数低于0.16后扬 程骤降一致。



# 图 6 不同空化数下叶片全氟三乙胺蒸汽体积分数 0.5 等值面示意图



图 7 为不同空化数下转轮叶片全氟三乙胺蒸汽 体积分数示意图。从图中可以看出,空化区域集中 在压力面头部,这是由离心泵结构导致的。叶轮进 口轴向来流在叶片前缘附近流向骤然变为径向,且 速度增大。能量转换在叶根处最为剧烈,形成显著 的低压区,导致空化形成。当空化数不断减小时,空 泡所占面积逐渐增加。



图 7 不同空化数下转轮叶片全氟三乙胺蒸汽体积分数 Fig. 7 Perfluorotriethylamine vapor volume fraction on the impeller blade under different cavitation numbers

# 3.2 变物性空化数值计算

空化现象发生时,液体介质从液相转化为气相 的过程中会吸收热量,这将导致局部流体的温度下 降,这种现象称为空化热效应。对于水等普通介质, 汽化潜热造成的局部温度下降一般可以忽略不计. 而对于低温介质,由于其物性参数随温度变化敏感, 导致其空化机理极其复杂。当流域内某部分压力低 于饱和蒸气压时,汽化潜热的存在会造成周围流体 的液相温度下降,该部分饱和蒸气压随之减小,这种 变化反而会抑制低温流体空化现象的产生,使得此 区域内流体介质空化特性在液相气化以及液体本身 物性参数变化的共同作用下达到动态平衡。全氟三 乙胺物性参数随温度变化如表1所示。考虑到全氟 三乙胺物性参数对温度变化较为敏感,其中饱和蒸 气压随温度呈指数变化,因此不可忽略热效应对全 氟三乙胺空化特性的影响。将全氟三乙胺密度、粘 度、比热、导热系数及饱和蒸气压等物性参数在软件 Fluent 中以 expression、polynomial 及 piecewise-linear 形式表示,边界条件设置与2.2节一致。

图 8 为不同空化数下离心泵扬程变化特性曲 线。从图中可以看出,当空化数从 0.13 逐渐增加 时,扬程几乎没有发生变化,说明在考虑工质本身热 效应影响条件下,在当前空化数范围内,空化数对离 心泵外特性未产生显著影响。 表1 不同温度下全氟三乙胺物性参数

Tab. 1 Physical property parameters of perfluorotriethylamine at different temperatures

温度/ ℃	密度/ kg·L <sup>-1</sup>	粘度/ mPa•s <sup>-1</sup>	比热/ kJ·kg <sup>-1</sup> ・ K <sup>-1</sup>	导热系数∕ W·m <sup>-1</sup> ・ K <sup>-1</sup>	饱和蒸 汽压/ kPa
- 40	1.914 8	7.75	1.183	0.052	0.08
- 30	1.888 8	5.03	1.161	0.054	0.83
- 20	1.8616	3.42	1.144	0.060	1.48
- 10	1.833 6	2.46	1.134	0.068	2.71
0	1.804 9	1.90	1.130	0.079	5.23
10	1.776 1	1.57	1.134	0.093	10.30
20	1.747 3	1.37	1.145	0.110	16.88
30	1.7189	1.25	1.165	0.130	27.40
40	1.6913	1.18	1.194	0.153	41.99
50	1.664 7	1.14	1.232	0.179	61.33





为进一步了解离心泵内空化流动情况,图9给 出了叶轮流域全氟三乙胺蒸汽体积分数0.2等值面 示意图。可以看出,当空化数大于0.12时,离心泵 内几乎没有发生空化现象,仅在转轮叶片前缘存在 极少且较小的空泡。当空化数为0.12时,在叶片前 缘存在一定数量的空泡,但并未堵塞通道。

图 10 为变物性工况下转轮叶片全氟三乙胺蒸 汽体积分数。从图中可以看出,当空化数为 0.12 时,在叶片前缘附近存在部分空化区域,但体积分数 小于 0.5,空化现象并不明显。当空化数增加到 0.13 时,叶片前缘附近只存在极少全氟三乙胺蒸汽 点状区域。当空化数继续增大时,叶片区域全氟三 乙胺蒸汽体积分数并没有发生变化。对比图 6 发 现,转轮流域内流体空化现象明显得到抑制,这是因 为当工质物性受温度影响时,随着泵内空化程度的 发展,空泡附近区域温度因工质汽化潜热降低,饱和 蒸气压随之下降,工质难以达到空化所需压力,空化 现象得到抑制。



# 图 9 叶轮流域全氟三乙胺蒸汽体积分数 0.2 等值面示意图

Fig. 9 Iso – surface diagram of perfluorotriethylamine vapor volume fraction of 0.2 in the impeller flow domain



叶片蒸汽体积分数

Fig. 10 Vapor volume fraction on impeller blade under different cavitation numbers under variable physical properties

不同空化数下叶片区域压力分布如图 11 所示。 可以看到,叶片前缘区域压力值在饱和蒸气压 (16 880 Pa)附近。当空化数为 0.12 时,最低压力 为 14 350 Pa,当空化数在 0.13 及以上时,最低压力 为 16 350 Pa,略低于饱和蒸气压。因此,随着空化 数从 0.12 增大到 0.13 时,空化区域面积骤减。反 映到泵能量特性上表现为空化数从 0.13 不断增加 时,空化面积不变,扬程不发生变化,与图 8 结果相 一致。

图 12 为不同空化数下转轮中截面流线与速度

分布云图。可以看出,随着空化数的增大,流场内速 度与流线分布特征并没有发生明显变化。这是因为 在当前工况下,流域内空化现象十分微弱,随着空化 数增加,泵内压力会产生细微变化,但是流动特征与 空化特性并不会发生显著变化,因此离心泵内整体 流动特征并不会因空化数改变而发生明显变化。





图 12 不同空化数下转轮中截面流线与速度分布云图 Fig. 12 Contours of streamline and velocity distributions on impeller mid – section under different cavitation numbers

#### 3.3 不同热源输入数值计算

在实际运行过程中,电机定子产生的热功耗可 通过壁面传递到流经冷却回路的流体中,对流体进 行加热,流体饱和蒸气压受温度影响将上升,这可能 会对离心泵内空化性能产生影响。因此,探究不同 热功率输入对内部流场的影响具有至关重要的价值 和意义。

图 13 为离心微泵流域加热面。假设电机定子 热功耗全部通过电子定子外壁面传递给流经冷却回 路的工质,通过设置不同的热流密度输入,探究电机 定子热功耗对离心泵空化特性的影响。热流密度 *q* 设置为 300、600 和 900 W/m<sup>2</sup>,工质物性与边界条件 设置同 3.2 节。



图 13 离心微泵流域加热面 Fig. 13 Heating surface in flow domain of centrifugal micropump

不同热流密度下各空化数对应离心微泵扬程数 值计算结果如图 14 所示。从图中可以看出,随着热 流密度的增大,各空化数下离心微泵扬程值并没有 发生明显变化,说明在此空化范围内,增大热流密度 并未影响离心微泵扬程。



图 14 不同热流密度下各空化数对应扬程计算结果 Fig. 14 Calculation result of each cavitation number corresponding to the head under different heat flux densities

图 15 为不同热流密度下, 空化数为 0.12 及 0.15 时对应转轮叶片处全氟三乙胺蒸汽体积分数。 因为空化数低于 0.13 时, 空间微泵内空化现象较 弱, 所以只展示两种典型工况。从图中可以看出, 在 各空化数下, 对流域进行不同的热源输入, 离心泵内 全氟三乙胺的位置和体积分数没有发生变化, 与前 文无热源输入下数值计算结果相同。在泵能量特性 上表现为扬程不随热流密度的增加而变化。

图 16 为 σ = 0.12 时, q = 900 W/m<sup>2</sup> 与 q = 0 W/m<sup>2</sup>下流域中轴面全氟三乙胺蒸汽体积分数。 从图中可以看出,增大热流密度,仅改变了轴与叶轮 通孔处空化流动工况,对离心泵内部流动并无影响。



图 15 不同热流密度对应各工况全氟三乙胺 蒸汽体积分数

Fig. 15 Perfluorotriethylamine vapor volume fraction corresponding under different heat flux densities for various operating conditions





图 17 为不同热流密度下流域中轴面温度与 流线分布云图。可以看出,在未加热时,工质流经 冷却回路,从通孔中回到离心微泵叶轮流域内。 输入900 W/m<sup>2</sup>的热流密度后,工质在电机定子外 壁面处受热,使通孔处因为截面积进一步缩小,导 致工质在通孔处温度明显上升,使饱和蒸气压上 升。工质发生空化后转为气态,从而对回路造成 一定程度的堵塞,使得离心微泵内的流动状况并 未发生变化。因此,电机热功率输入并未对离心 泵内空化性能产生影响。



图 17 不同热流密度下流域中轴面温度与流线分布云图 Fig. 17 Contours of temperature and streamline distributions on axial plane of flow domain

## 4 结 论

本文研究了一种以全氟三乙胺为工质的空间微 型离心泵,探究了热效应及电机热功率对离心泵空 化特性的影响,主要结论如下:

(1)受离心泵结构影响,空泡大多聚集在叶片前缘位置,随着空化数的增大,空化区域逐渐减小。

(2)当考虑工质物性随温度变化时,空化区域 面积受热效应影响大幅缩小,空化数对扬程的影响 也相应减弱。因此,当离心泵发生空化时,热效应的 影响不可忽略。

(3)当考虑电机定子热功耗时,回流冷却通道 中工质的温度因受热而升高,当流经转轴通孔处时 发生空化,对回流通道造成堵塞,电机热功率并不能 很好地传递至离心泵转轮流域,离心微泵扬程值也 没有随输入热源值增大而变化。因此,电机定子热 功率对离心泵转轮流域空化特性与外特性并不会产 生直接影响。

## 参考文献:

- [1] 任志鹏,李德友,王洪杰,等. 空间微泵气液溶解与析出流动及 传质研究[J]. 工程热物理学报,2024,45(7):1970-1976.
  REN Zhipeng, LI Deyou, WANG Hongjie, et al. Investigation on gas-liquid dissolved-released flow and mass transfer in a space micropump[J]. Journal of Engineering Thermophysics,2024,45(7): 1970-1976.
- [2] MOORE R D, RUGGERI R S. Method for prediction of pump cavitation performance for various liquids, liquid temperatures and rota-

tion speeds[R]. NASA Technical Note, NASA TN D-5292, 1969.

- [3] 时素果,王国玉,胡常莉,等.不同温度水体空化水动力脉动特性的试验研究[J].机械工程学报,2014,50(8):174-181.
   SHI Suguo, WANG Guoyu, HU Changli, et al. Experimental study on hydrodynamic characteristics of cavitating flows around hydrofail under different water temperatures[J]. Journal of Mechanical Engineering,2014,50(8):174-181.
- [4] 曹潇丽. 低温流体汽蚀的 CFD 模拟及实验研究[D]. 杭州:浙 江大学,2011.

CAO Xiaoli. CFD simulation and experimental research of low temperature fluid cavitation[D]. Hangzhou; Zhejiang University, 2011.

- [5] 赵东方,朱佳凯,徐 璐,等. 文氏管中低温流体汽蚀过程可视 化实验研究[J]. 低温工程,2015(6):56-61.
  ZHAO Dongfang, ZHU Jiakai, XU Lu, et al. Visualization experiment of cavitating flow of cryogenic fluid in Venturi tube[J]. Cryogenics,2015(6):56-61.
- [6] HOSANGADI A, AHUJA V. Numerical study of cavitation in cryogenic fluids [J]. Journal of Fluids Engineering, 2005, 127: 267-281.
- [7] 季 斌,罗先武,吴玉林,等.考虑热力学效应的高温水空化模拟[J].清华大学学报(自然科学版),2010,50(2):262-265.
  JI Bin,LUO Xianwu, WU Yulin, et al. Cavitating flow simulation for hightemperature water based on thermodynamic effects [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology),2010, 50(2):262-265.
- [8] HUANG B, WU Q, WANG G. Numerical investigation of cavitating flow in liquid hydrogen[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2014, 39:1698 – 1709.
- [9] YU A, TANG Q, ZHOU D, et al. Entropy production analysis in two-phase cavitation flows with thermodynamic cavitation model [J]. Applied Thermal Engineering, 2020, 171:115099.

[10] 魏爰博. 低温非定常空化流动机理及其诱导噪声特性研究
[D]. 杭州:浙江大学,2024.
WEI Aibo. Study on mechanisms of cryogenic unsteady cavitating flow and the induced noise characteristics [D]. Hangzhou; Zhe-

jiang University, 2024.

[11] 马静雯,王诗平,杨英狄,等.考虑热效应的空化流动研究进展[J].力学学报,2024,56(8):2165-2183.
MA Jingwen, WANG Shiping, YANG Yingdi, et al. A review on cavitation flows considering thermal effects[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics,2024,56(8):2165-2183.

[12] 朱雨桐. 微重力下空间微泵空化流动机理研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学,2022.

ZHU Yutong. Study on mechanism of cavitation flow of a space micropump under microgravity condition [D]. Harbin : Harbin Institute of Technology,2022.

- [13] REZNIK S N, YARIN A L. Spreading of an axisymmetric viscous drop due to gravity and capillarity on a dry horizontal wall[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2002, 28:1437 – 1457.
- [14] BARTASHEVICH M V, KUZNETSOV V V, KABOV O A. Gravity effect on the axisymmetric drop spreading [J]. Microgravity Science and Technology, 2010, 22:107 – 114.
- [15] BRUTIN D, ZHU Z Q, RAHLI O, et al. Sessile drop in microgravity: Creation, contact angle and interface[J]. Microgravity Science and Technology, 2009, 21:67 - 76.
- [16] 朱志强,汪 洋,刘秋生. Bond 数变化对固壁液滴接触角的影响[J]. 工程热物理学报,2012,33(2):251-254.
  ZHU Zhiqiang, WANG Yang, LIU Qiusheng. Influence of Bond number on the contact angle of liquid drops deposited on solid substrates [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2012, 33(2):251-254.

(刘 颖 编辑)