

# 复杂结构低温涡轮泵预冷特性集总参数仿真研究

秦毅<sup>1</sup>, 李耀阳<sup>2</sup>, 李卓伦<sup>1</sup>, 刘刚毅<sup>2</sup>, 王磊<sup>1</sup>

(1. 西安交通大学制冷与低温工程研究所, 710049, 西安; 2. 北京航天动力研究所, 100076, 北京)

**摘要:** 为实现火箭发动机低温涡轮泵预冷特性与规律的定量预测, 解决 AMESim 软件无法准确预测预冷两相传热的技术挑战, 开展了液氧涡轮泵预冷的集总参数仿真研究。首先, 采用热容等效方法将涡轮泵复杂结构简化为环状管流模型, 实现了涡轮泵壳与芯体同步预冷求解; 然后, 将低温预冷两相流型判定与沸腾传热模型植入 AMESim 软件, 建立了涡轮泵预冷多节点集总参数预测模型; 最后, 采用该预冷模型对复杂液氧涡轮泵预冷规律开展了变工况预示。结果表明: 所建立低温预冷集总参数模型在预测预冷耗时最大误差小于 6.0%; 液氧涡轮泵芯体预冷时间为壳体耗时的 3.7%, 因此泵壳预冷耗时决定了涡轮泵整体预冷进程; 提高入口压力有利于强化流体与结构体间的传热速率, 实现快速预冷, 但会增加预冷过程液体消耗量。所建立的 AMESim 预冷模型为研究火箭低温发动机规律提供了一种新的方法选择。

**关键词:** 涡轮泵; 低温预冷; 集总参数仿真; 沸腾传热

**中图分类号:** V421.4+2 **文献标志码:** A

**DOI:** 10.7652/xjtuxb202511017 **文章编号:** 0253-987X(2025)11-0177-10

## Lumped-Parameter Simulation Study on Precooling Characteristics of Cryogenic Turbopumps with Complex Structures

QIN Yi<sup>1</sup>, LI Yaoyang<sup>2</sup>, LI Zhuolun<sup>1</sup>, LIU Gangyi<sup>2</sup>, WANG Lei<sup>1</sup>

(1. Department of Refrigeration and Cryogenic Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;  
2. Beijing Institute of Aerospace Power, Beijing 100076, China)

**Abstract:** To achieve quantitative prediction of precooling characteristics and patterns in rocket engine cryogenic turbopumps, addressing the technical challenge where AMESim software cannot accurately predict two-phase heat transfer during precooling, a chilldown simulation of liquid oxygen turbopump by lumped parameter approach. First, the complex turbopump structure was simplified based on a thermal capacitance equivalence method, enabling synchronous precooling simulation of pre-cooling for both the turbopump casing and core. Subsequently, cryogenic two-phase flow pattern identification and boiled heat transfer models are incorporated into AMESim software to establish a multi-node lumped-parameter prediction model for turbopump precooling. Finally, this model is employed to predict the precooling behavior of a complex liquid oxygen turbopump under varying operating conditions. Results demonstrate that the developed cryogenic precooling lumped-parameter model achieves a maximum error of less than 6.0% in predicting precooling duration. The core precooling time constitutes merely 3.7% of the casing precooling time, indicating that the casing's precooling process dominates the overall turbopump precooling

progression. Increasing the inlet pressure enhances heat transfer rates between the fluid and structure, facilitating rapid precooling, albeit at the cost of greater liquid consumption during the process. The established AMESim precooling model provides a novel methodological option for studying the operational principles of cryogenic rocket engines.

**Keywords:** turbopump; cryogenic chilldown; lumped-parameter simulation; boiled heat transfer

低温火箭发动机点火前,需要对涡轮泵等重要部件展开充分预冷。若预冷不充分,当火箭发动机启动时,涡轮泵内大温差换热会诱发剧烈的气液相变,导致涡轮泵汽蚀,严重时会造成涡轮泵损坏甚至启动失败<sup>[1]</sup>。因此,低温涡轮泵预冷过程对于火箭正常工作至关重要。低温预冷是一个复杂的强瞬变热物理过程,低温通道内流体的气液两相流型、流体与壁面间换热模式等呈现复杂的时空相关性,造成开展预冷预示面临较大挑战。AMESim 仿真软件具有元件库丰富、仿真效率高等优势,在火箭发动机设计领域获得了广泛应用,但其自带模块无法准确考虑预冷中复杂气液两相流与流-固耦合换热,导致开展低温涡轮泵预冷预示时误差极大<sup>[2]</sup>。因此,对 AMESim 软件进行修正,实现对低温预冷中气液两相流瞬变与沸腾传热特征的准确表征,对于火箭发动机点火时序设置与预冷方案优化具有重要意义。

目前,低温预冷研究主要以简单结构管路预冷试验为主。NASA 分析了管道内径为 11.68 mm 的小尺寸竖直管<sup>[3-7]</sup>的质量流速、入口过冷度、压力等参数对预冷过程的影响,并搭建了内径为 2.54、11.43 cm 的液氧、液甲烷水平管预冷试验台<sup>[8]</sup>。印度 TKM 工程学院开展了短距离铜管预冷试验<sup>[9]</sup>,分析了重力及流量对预冷速率的影响<sup>[10]</sup>。韩国学者搭建了长度为 7 m 的预冷管路系统,开展了长距离管路预冷试验研究<sup>[11-12]</sup>。国内学者也开展了液氧、液甲烷流经不同管路的低温预冷试验<sup>[13-15]</sup>,并关注了快速预冷技术及其验证<sup>[16]</sup>。需要说明的是,绝大部分低温预冷试验以小尺寸、简单管路为对象,而对复杂结构系统的预冷试验鲜有报道。学者们基于大量试验数据开发了低温预冷预测关联式或预冷模型<sup>[17-18]</sup>,为开展仿真研究奠定了基础。整体来看,预冷模型包括均相流模型<sup>[19-20]</sup>和两流体模型<sup>[21-22]</sup>,仿真方法则包括沿管流方向的一维仿真与考虑结构特征、流型分布的三维仿真。其中,三维仿真主要针对简单直管开展了典型两相流型分布下的多物理场耦合预测。NASA<sup>[23]</sup>基于 FLUENT 软件构建了管路预冷三维模型,能够预测膜态沸腾区的降温规律。不同于简单管路,火箭发动机涡轮泵结

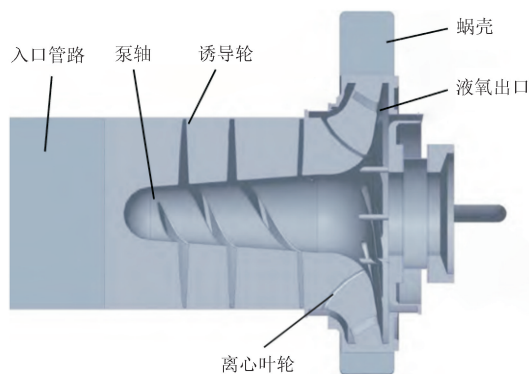
构复杂,有学者针对液氢涡轮泵开展了三维仿真<sup>[1]</sup>,但也面临耗时长、预示精度较低等挑战。需要说明的是,三维仿真的计算量极大,在低温预冷预测领域尚未获得大规模应用,目前,低温预冷仿真仍以一维仿真为主。学者们基于低温预冷两相流型与沸腾传热模型开发了多种一维仿真程序<sup>[18-19,24-26]</sup>,也有学者延续一维编程思路,采用 AMESim 软件开展了液氧发动机循环预冷<sup>[27]</sup>、氢循环泵强迫预冷<sup>[28]</sup>、复杂管路系统预冷<sup>[29]</sup>等仿真研究。但由于 AMESim 软件自带 Steiner 模型用于低温预冷两相传热计算时误差较大,难以获得对低温预冷规律的准确预示。

目前,AMESim 软件在火箭发动机仿真研究中获得了广泛应用,但软件内置换热模块应用于低温预冷预示时误差较大。为此,本文将低温预冷气液两相流型判定方法与流体-管壁沸腾传热模型植入 AMESim 软件,实现功能扩展,从而解决 AMESim 无法准确预测预冷规律的技术瓶颈。在此基础上,对涡轮泵复杂结构进行合理简化,以期通过计算预示同时获得泵芯、泵壳的降温与预冷耗时等关键信息。通过研究,本文所建立修正模型可为研究复杂低温涡轮泵预冷规律提供一种可靠的研究工具,有利于将预冷模块内嵌至整个发动机仿真模型,实现发动机整体系统的动态仿真。

## 1 物理对象

火箭发动机液氧涡轮泵结构<sup>[30]</sup>如图 1 所示,主要包括入口管路、泵轴、诱导轮、离心叶轮、蜗壳等。其中,泵轴材料为 1Cr18Ni9Ti 不锈钢,直径为 25 mm,轴体质量为 0.8 kg,叶轮及泵外壳材料为铝合金 2A14,外壳质量为 3.6 kg,涡轮泵长度为 154 mm,流体通道水力直径约 42 mm。

如图 1 所示,相较于直管,涡轮泵结构复杂,其中诱导叶轮、离心叶轮等结构会对预冷过程中泵内液氧流量产生影响。需要说明的是,涡轮泵预冷实质是通过低温流体与泵体结构的换热,将泵壳与泵芯结构蓄热带走,实现泵体结构降温。因此,在预冷分析中,可对泵结构做必要简化,忽略诱导轮、离心叶轮等复杂结构影响,保持泵体结构流道的几何相似与泵体蓄热量恒定。

图 1 液氧涡轮泵结构示意图<sup>[30]</sup>Fig.1 Schematic diagram of liquid oxygen turbine pump structure<sup>[30]</sup>

## 2 AMESim 预冷模型

### 2.1 物理模型简化

如前所述,实际的涡轮泵结构异常复杂,各结构材料也不相同。当采用 AMESim 软件开展涡轮泵预冷预示时,几何模型的简化必须考虑研究目标的需求约束。由于 AMESim 软件的固有特征,其开展预冷时并不关注具体的两相流规律与物理场空间分布,而主要关注预冷过程的温降耗时或预冷过程的液体消耗量。因此,按照涡轮泵外壳、轴体和叶轮的几何结构与材料属性,将其简化为回转体结构,确保泵壳、液氧流道与轴体的体积与热容守恒,建立了如图 2 所示的环状液氧流道。图中, $q_{cas}$ 是流体与外壳的对流换热热流密度, $q_{core}$ 是流体与芯体的对流换热热流密度。

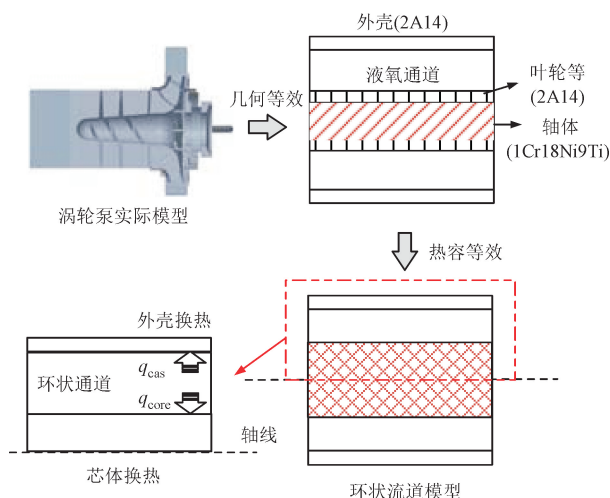


图 2 涡轮泵简化模型

Fig.2 Simplified model of turbopump

对于叶轮等结构,忽略其对流场空间分布的影响,将其与轴体合并,进一步简化为等效柱体,等效柱体的材料热物性根据轴体材料、叶轮材料的质量加权确定。简化后的模型能够保证涡轮泵金属外壳与泵芯自身蓄热与实际涡轮泵相同,以满足 AMESim 建模需求。该简化方法一方面能够表征低温预冷的基本特征,有利于对涡轮泵预冷规律的快速预示;另一方面,简化后的预冷模块易于火箭发动机系统整体 AMESim 模型调用,实现了涡轮泵预冷与发动机其他规律的耦合分析。简化模型的流体通道为环状流道,即在同一截面处需同时考虑流体与泵壳体、柱状芯体的热交换。在 AMESim 仿真中,无内置元件能够模拟环状管道两相流传热过程。本文将泵壳换热与芯体换热过程分别计算,过程如图 3 所示,其中  $q_1$ 、 $q_2$  分别为泵壳、芯体换热热流密度。确保两计算支路的入口与出口条件相同,将支路的热流返回环状通道主路,从而实现对环状通道两相传热的模拟。

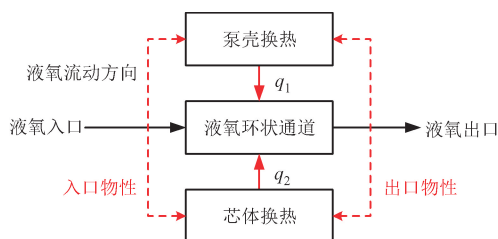


图 3 液氧涡轮泵内传热过程示意图

Fig.3 Schematic diagram of heat transfer process in the liquid oxygen turbopump

利用压力-温度源、压力传感器、漏热管、热流传感器及热容等元件将泵的外壳换热与芯体换热过程分离,由两条相互独立的支路分别计算换热过程,计算支路的流体通道、入口与出口压力与主回路保持一致,保证模型在换热过程中流量相同。同时,将支路换热过程中输出的热流信号叠加返回主回路,实现泵壳换热与泵芯换热耦合,进一步建立如图 4 所示的涡轮泵模型。涡轮泵模型表征为图 4 上方的主流道部分,而涡轮泵预冷换热则由下方的两条支路完成,由涡轮泵前的压力传感器与密度传感器及涡轮泵后的压力传感器控制计算支路液氧物性参数和入口质量流量,由热流传感器将计算支路的热流值返回主回路开展后续计算。

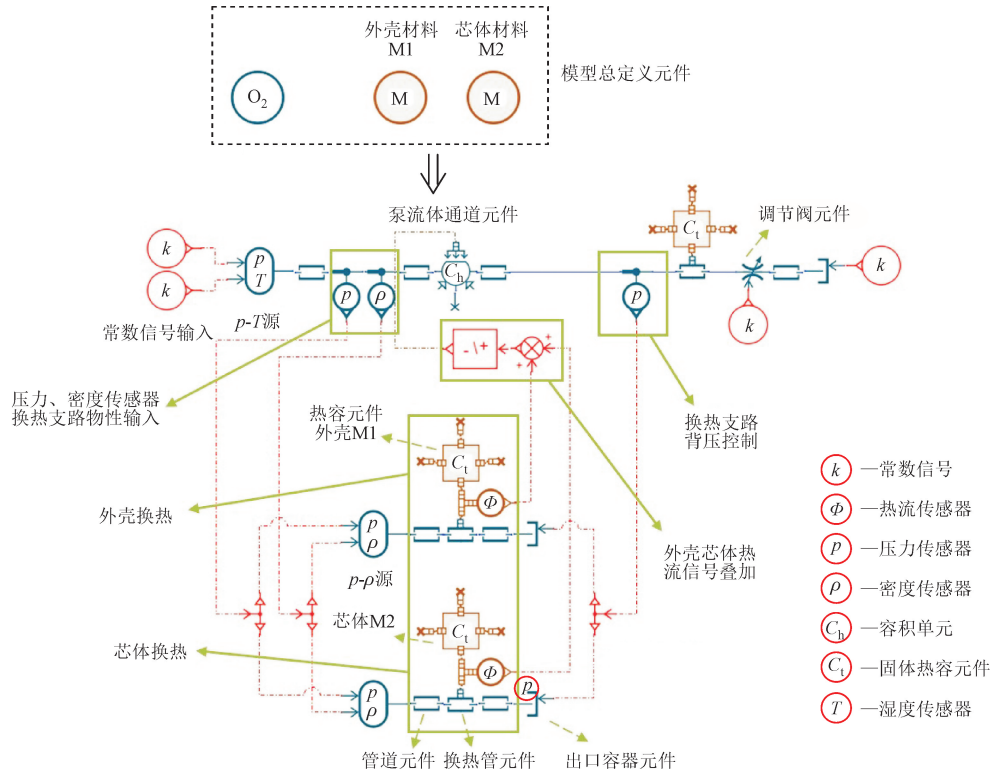


图 4 基于 AMESim 软件的涡轮泵仿真模型

Fig. 4 Turbopump simulation model based on AMESim software

## 2.2 换热模型

当低温液体注入涡轮泵后,泵结构与低温液体间存在较大温差,涡轮泵内发生复杂的沸腾换热与气液两相流,且随着预冷过程持续,换热温差逐渐减小,沸腾传热模式与管内两相流型呈现强瞬变特性。低温预冷换热规律如图 5 所示,其中 ONB 为沸腾起始点,CHF 为临界热流密度点,LFP 为莱顿弗罗斯特点。可以看出,由预冷起始点开始,低温液体与固壁间依次经历气相对流、膜态沸腾、过渡沸腾、核态沸腾及液相对流传热 5 个阶段。低温预冷仿真的关键是确定泵结构的瞬变壁温与流体相态确定换热模式与换热热流。首先,通过壁面温度与含气率判

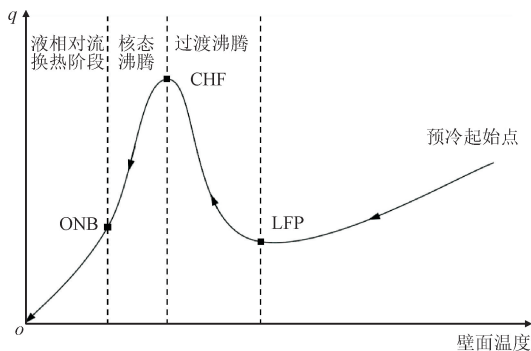


图 5 低温预冷过程沸腾曲线

Fig. 5 Boiling curve of cryogenic chilldown process

断壁面所处换热模态;然后,对不同阶段采用对应的换热关联式求解流体与壁面间换热热流。

当含气率  $x = 0$  或  $1$  时,流道内流体为全气相或全液相,壁面与流体之间的换热处于单相换热阶段,采用 Dittus-Boelter 公式计算换热系数

$$h = 0.023 Re_f^{0.8} Pr_f^{0.4} k_f / d \quad (1)$$

式中:  $Re_f$  为雷诺数;  $Pr_f$  为普朗特数;  $k_f$  为流体导热系数;下标  $f$  在  $x = 0$  时表示液相,在  $x = 1$  时表示气相;  $d$  为特征长度。

当含气率  $0 < x < 1$  时,流道中出现气液两相流,起始阶段支配管壁温降的换热主要为反环状流膜态沸腾,即在大温差下,沸腾气膜将液相与壁面分隔。在图 5 中,预冷过程从膜态沸腾转变为过渡沸腾的转变点和从过渡沸腾转变为核态沸腾的转变点是确定当前预冷换热阶段的主要判据。对于转变点温度, Jin 关联式的预测值与试验数据偏差小于  $10\%$  [12,20]。因此,本文采用该式计算最低膜态沸腾温度。当壁温超过膜态沸腾转变温度 ( $T_{MFB}$ ) 时,换热为膜态沸腾;当壁温小于临界热流密度点温度 ( $T_{CHF}$ ) 时,换热进入核态沸腾,而当壁温处于  $T_{MFB}$  和  $T_{CHF}$  之间时,则为过渡沸腾。  $T_{MFB}$  和  $T_{CHF}$  的计算公式分别为



$$T_{\text{MFB}} = \frac{1+\beta}{C\sqrt{\mu_l}}(T_{\text{cr}} - T_{\text{sat}}) + T_{\text{sat}} \quad (2)$$

$$\beta = \sqrt{\frac{k_l \rho_l c_{pl}}{k_w \rho_w c_w}} \quad (3)$$

$$\frac{T_{\text{CHF}} - T_{\text{sat}}}{T_{\text{cr}} - T_{\text{f}}} = 0.1 + 1.5\beta^{0.5} + 0.6\beta^2 \quad (4)$$

式中:  $C$  为修正常数,对于液氧、液氮, $C$  取 76.46;  $T_{\text{cr}}$  为流体临界温度;  $T_{\text{sat}}$  为饱和温度;  $\mu_l$  为液相黏度;  $k_l$ 、 $k_w$  分别为液相和壁面导热系数;  $\rho_l$ 、 $\rho_w$  分别为液相和壁面材料密度;  $c_{pl}$  为液体比定压热容;  $c_w$  为固体比热容。

在膜态沸腾阶段, Darr 公式预测值与试验数据吻合较好<sup>[4]</sup>。本文选用 Darr 公式计算膜态沸腾换热

$$h_{\text{fb}} = h_{\text{b}} + h_{\text{tc}} + h_{\text{dw}} \quad (5)$$

$$h_{\text{b}} = c_1 \left[ \frac{\rho_v (\rho_l - \rho_v) g h_{\text{fg}} k_v^3}{4L\mu_v (T_i - T_{\text{f,sat}})} \right]^{1/4} \quad (6)$$

$$h_{\text{tc}} = c_2 \left[ 1 + \left( \frac{D}{L + 0.1D} \right)^{0.7} \right] \left( \frac{k_v}{D} \right) (1-x)^{c_3} Re_v^{c_4} Pr_v^{0.4} \quad (7)$$

$$h_{\text{dw}} = c_5 \left( \frac{k_f}{D} \right) \exp \left[ - (L/D)^{c_6} \right] We_f^{c_7} Ja_f^{-1} \quad (8)$$

式中:  $h_{\text{b}}$ 、 $h_{\text{tc}}$ 、 $h_{\text{dw}}$  分别代表低流量下对流换热系数、中高雷诺数下强制对流换热系数、高雷诺数下液滴-壁面换热系数;  $\rho_v$  为气相密度;  $g$  为重力加速度;  $h_{\text{fg}}$  为汽化潜热;  $k_v$  为气相导热系数;  $L$  为结构长度;  $D$  为管径;  $\mu_v$  为气相黏度;  $c_1 \sim c_7$  为经验系数;  $T_i$  是节点  $i$  的壁面温度;  $T_{\text{f,sat}}$  为流体饱和温度;  $We_f$  为韦伯数;  $Ja_f$  为雅各比数。

在 AMESim 中, 含气率项易导致计算发散。为避免该情况, 同时适应 AMESim 软件的嵌入需要, 考虑在膜态沸腾阶段以气相对流换热为主导, 对公式(5)~(8)进行如下简化

$$h_{\text{fb}} = c_8 h_{\text{b}} \quad (9)$$

式中:  $c_8$  是针对简化后产生误差的修正项。若壁面温度低于  $T_{\text{CHF}}$ , 为核态沸腾阶段, 壁面与流体间换热量比在膜态沸腾状态下明显增大。针对核态沸腾, Chen 关联式预测精度较高<sup>[31]</sup>, 其换热系数包括对流项与沸腾项两部分

$$h = Sh_{\text{NB}} + Fh_{\text{CV}} \quad (10)$$

$$h_{\text{CV}} = 0.023 Re_l^{0.8} Pr_l^{0.4} k_l / D \quad (11)$$

$$F = \max \left[ 1.0, 2.35 \left( \frac{1.0}{X_{\text{tt}}} + 0.213 \right)^{0.736} \right] \quad (12)$$

$$X_{\text{tt}} = \left( \frac{1-x}{x} \right)^{0.9} \left( \frac{\rho_v}{\rho_l} \right)^{0.5} \left( \frac{\mu_l}{\mu_v} \right)^{0.1} \quad (13)$$

$$h_{\text{NB}} = \frac{0.00122 k_l^{0.79} c_{pl}^{0.45} \rho_l^{0.49}}{\sigma^{0.45} \mu_l^{0.29} h_{\text{fg}}^{0.24} \rho_g^{0.24}} (T_w - T_{\text{sat}})^{0.24} \Delta p^{0.75} \quad (14)$$

$$S = [1 + 2.53 \times 10^{-6} (Re_l F^{1.25})^{1.17}]^{-1} \quad (15)$$

式中:  $k_l$  为液相导热系数;  $T_w$  为管壁温度;  $\sigma$  为表面张力;  $Re_l$ 、 $Pr_l$  分别为液相雷诺数、液相普朗特数;  $\Delta p$  为压差;  $\rho_g$  为气相密度。可以看出, Chen 关联式结构复杂, 参数较多, 植入软件极易造成发散。因此, 在本文仿真中, 采用如下关系式计算核态沸腾换热系数, 其中, 系数  $c_9$  和指数  $n$  根据与 Chen 公式的预测值比较确定, 公式为

$$h_{\text{nb}} = c_9 (T_w - T_{\text{sat}})^n \quad (16)$$

预冷仿真中, 有学者针对过渡沸腾推荐线性插值简化处理<sup>[18,24-25]</sup>。本文也采用相似处理方案, 过渡沸腾的传热系数根据壁温在临界热流密度点与膜态沸腾起始点之间线性插值计算。在 AMESim 软件中, 流体与壁面的换热计算主要在漏热管元件中完成, 由壁面热容元件向漏热管输入壁面温度, 计算流体与壁面温度差, 通过元件内部换热模型计算并返回对流换热。但元件内置的 Steiner 模型为一个整体模型, 相变换热计算中未考虑流体流型对换热系数的影响。因此, 将前述数学模型植入漏热管元件时, 按照图 6 所示逻辑执行, 漏热管元件根据输入的液体物性计算流体通道内含气率, 判断当前是否处于相变换热阶段; 随后, 由式(2)~(4)计算分界点温度, 并与壁面温度比较确定换热阶段, 对换热模型关联式(5)~(16)进行编译嵌入漏热管元件; 计算中, 读取该元件位置处的流体参数作为输入, 并在计

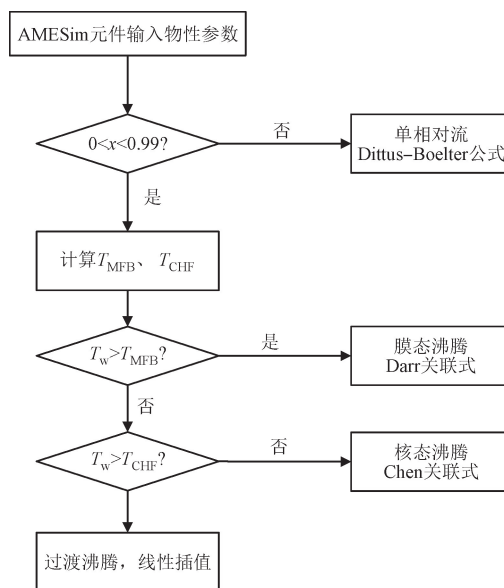


图 6 预冷两相换热计算逻辑

Fig. 6 Calculation logic of chilldown two-phase heat transfer

算完成时向仿真元件输出换热系数。

### 3 模型验证

选择 Darr 液氮预冷试验数据与仿真结果开展模型验证<sup>[3]</sup>。试验对象为长度为 572 mm、内径为 11.68 mm 的不锈钢管,预冷中不锈钢管实际结构及测点如图 7 所示,管壁厚度为 0.51 mm,试验工质为

0.175 MPa 压力下的饱和液氮。模型验证选择入口  $Re=5\,992$ 、入口质量流速  $G=68.4\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  的工况进行对比分析。根据测试对象的工况特征,建立了 AMESim 测试管模型如图 8 所示。在模型建立时,考虑沿管长方向划分 5、10、15 个节点,结果对比如图 9 所示。可以看出,节点数对结果无明显影响,故本文采用 10 个节点管路模型进行后续模型验证。

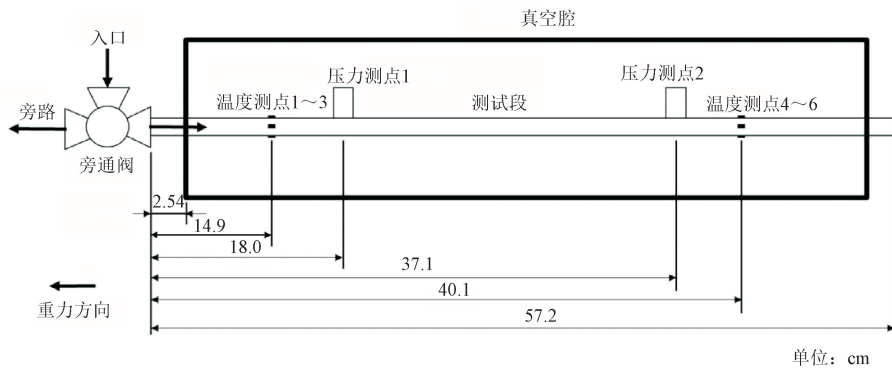


图 7 Darr 预冷试验管路结构<sup>[3]</sup>

Fig. 7 Darr pre-cooling test pipeline structure<sup>[3]</sup>

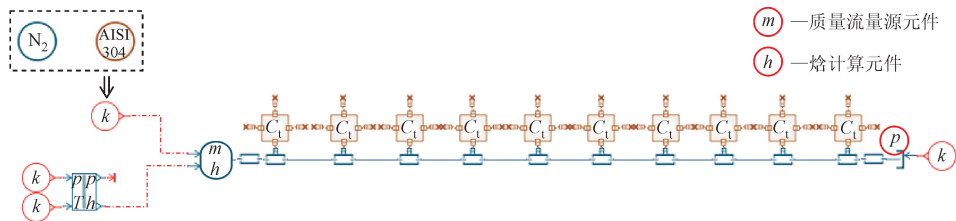


图 8 低温管路预冷模型

Fig. 8 Chillo-down model of cryogenic pipe

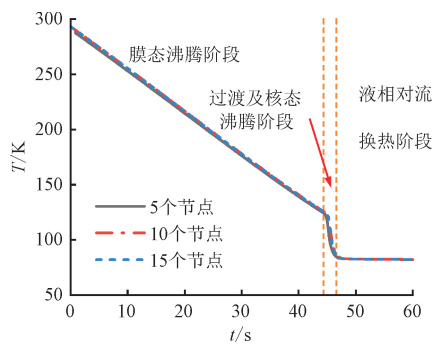


图 9 节点数独立性验证

Fig. 9 Node number independence verification

预冷过程管壁降温曲线对比如图 10 所示。可以看出,AMESim 原 Steiner 沸腾换热模型计算结果与试验数据存在明显偏离,而本文通过软件模型

拓展的仿真结果与试验数据吻合较好。在膜态沸腾阶段,预冷降温曲线与试验吻合较好,预冷时间与试验数据的相对误差小于 6.0%。

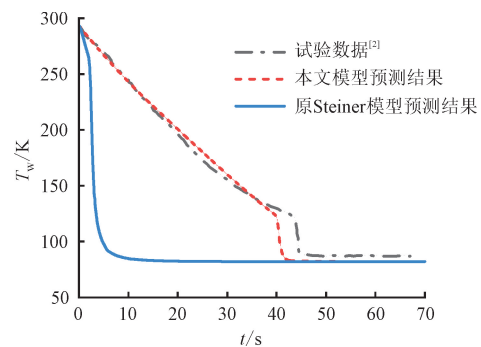


图 10 低温管路预冷降温曲线试验与预测结果比较

Fig. 10 Comparison of chilldown temperature decrease curves between experimental and calculated results

模型预示热流与试验壁面热流密度( $q_w$ )对比结果如图 11 所示。可以看出,整个预冷过程本文模型的预测结果与试验数据对比误差较小,而 Steiner 模型计算结果存在明显偏差。综上所述,本文所建立模型相比于 AMESim 原 Steiner 模型对低温预冷仿真预示具有更准确的预测精度。由于液氮与液氧物性相似,因此基于液氮试验数据验证的模型预测液氧流动与传热规律获得了低温工程领域的广泛认可。

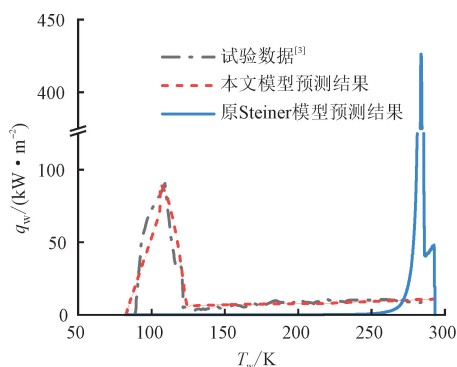


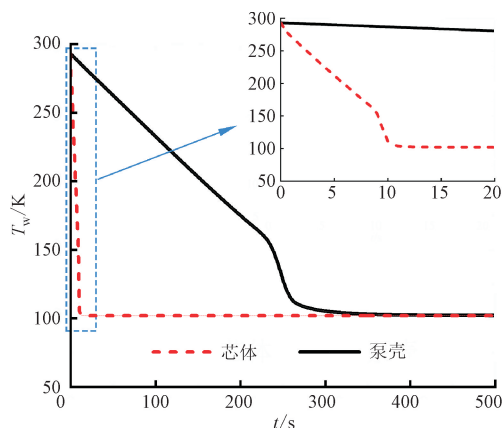
图 11 低温管路预冷过程沸腾曲线试验与预测结果比较

Fig. 11 Comparison of boiling curve in cryogenic chilldown process between experimental and calculated results

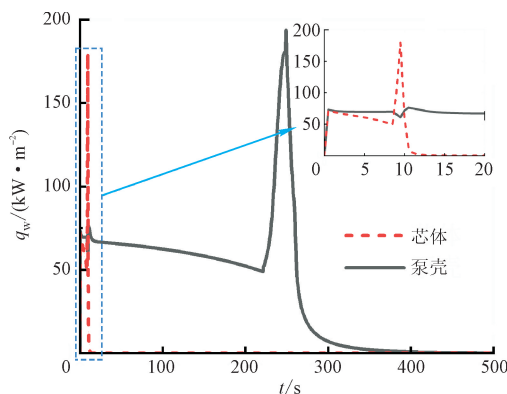
## 4 结果与讨论

### 4.1 泵壳与泵芯预冷过程分析

图 12 展示了入口压力  $P_{in}=0.3$  MPa、饱和液氧、质量流量为  $1.4 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$  条件下液氧涡轮泵预冷仿真结果。从图 12(a)可以看出,泵壳预冷耗时为 355 s,芯体预冷耗时仅为 13 s,为壳体预冷时长的 3.7%。这是因为涡轮泵的芯体相比于壳体体积更小,同时,芯体材料相比于壳体铝合金材料热容更低,因此芯体预冷明显更快。由此可知,在涡轮泵预冷中,整泵预冷所需时间取决于壳体的预冷时间。从图 12(b)可以看出,芯体与壳体所表现的换热规律基本一致。以壳体热流曲线为例,在第 221 s 时,壁面温度降至 163.7 K,发生膜态沸腾向过渡沸腾转变,由于膜态沸腾气膜破坏,流体与壁面间开始接触,导致流体与壁面传热热流急剧增大,壁面温度开始加速降低,到第 249 s 换热热流密度达到最大值  $193.64 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$ ,随后进入核态沸腾阶段,壁面温度快速降至液氧饱和温度,换热热流逐渐降低,267 s 时进入液相对流换热阶段,直至壁面温度降至液氧饱和温度,预冷过程结束。



(a) 降温曲线



(b) 热流曲线

图 12 液氧泵芯体与泵壳的预冷降温曲线及热流曲线比较 ( $P_{in}=0.3$  MPa)

Fig. 12 Comparison of temperature decrease curves and heat flux curves between pump core part and pump wall part under  $P_{in}=0.3$  MPa

### 4.2 入口压力对涡轮泵预冷影响

对涡轮泵预冷而言,在背压与涡轮泵结构一定的条件下,入口压力决定了预冷过程中的供液量,进而影响涡轮泵的预冷速率。在涡轮泵出口阀门开度一定的前提下,不同入口压力下涡轮泵预冷流量曲线可能在预冷初期和中期出现两次质量流量( $G_m$ )突降,如图 13 所示,这是因为芯体与泵壳换热依次进入核态沸腾时换热热流突然增大,流体汽化导致下游压力升高,进而造成系统压差降低。由图 13 可知,随着入口压力增大,预冷过程的流量和液氧消耗增大。图 14 为不同入口压力下涡轮泵预冷降温曲线。可以看出,随着入口压力增大,泵壳和芯体充分预冷所消耗时间逐渐缩短。在一定范围内,入口压力增大导致液氧流速增大,提高了预冷速率。从图 14(a) 也可看出,入口压力由 0.2 MPa 增加至 0.3 MPa 后,泵壳预冷耗时降低了 26.2%,继续增大至 0.4 MPa,预冷耗时继续降低 16.6%,通过提

高入口压力加速预冷进程的收益逐渐降低,这一情况在图 14(b)芯体换热中更为明显。

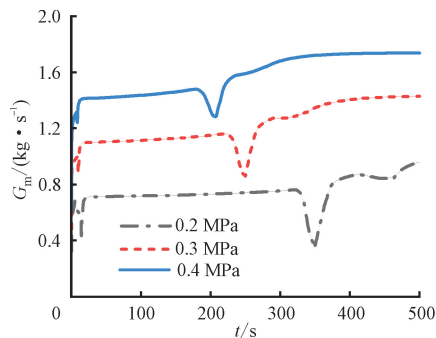
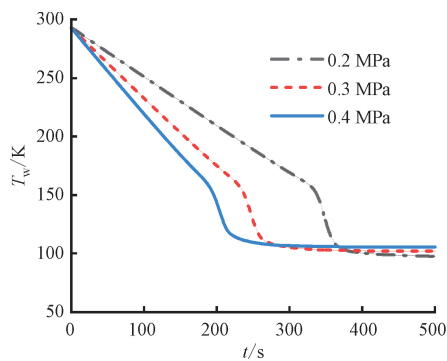
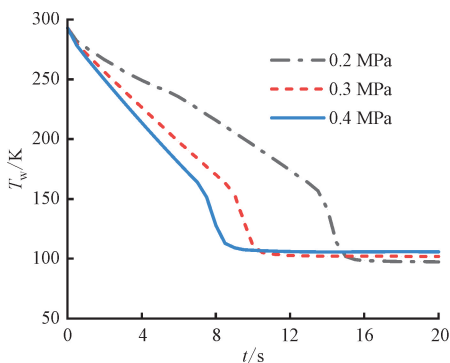


图 13 入口压力对液氧泵预冷过程流量曲线的影响

Fig. 13 Influence of inlet pressure on the mass flux during liquid oxygen turbopump chilldown process



(a) 泵壳换热



(b) 芯体换热

图 14 入口压力对液氧泵预冷曲线的影响

Fig. 14 Influence of inlet pressure on temperature decrease curves for liquid oxygen turbopump

不同入口压力下涡轮泵预冷时间、推进剂消耗量如表 1 所示。当入口压力由 0.2 MPa 提高至 0.3 MPa 时,预冷耗时减少 26.2%,但预冷过程的液体消耗量增加了 13.7%。可以看出,适当降低入口压力可减小推进剂消耗。

表 1 不同入口压力下涡轮泵预冷时间与推进剂消耗  
Table 1 Time cost and propellant consumption for turbopump chilldown under different inlet pressure conditions

| 入口压力/MPa | 预冷时间/s | 推进剂消耗量/kg |
|----------|--------|-----------|
| 0.2      | 481    | 353.98    |
| 0.3      | 355    | 402.54    |
| 0.4      | 296    | 432.57    |

## 5 结 论

本文以 AMESim 仿真软件为基础,建立了低温发动机液氧涡轮泵预冷预测模型,对典型工况及变工况下的预冷特征进行了计算预示,主要结论如下。

(1)采用热容等效方法对涡轮泵简化,将复杂泵结构视作泵壳与等效芯体构成的环状通道结构,建立了涡轮泵预冷仿真模型。利用漏热管元件将环状通道的壳体与芯体换热过程分为两条独立支路计算,采用信号叠加实现涡轮泵泵壳与芯体的同步预冷与耦合传热模拟,所建立模型可为复杂涡轮泵预冷研究提供新的工具选择。

(2)将低温预冷两相流型判定与传热模型植入 AMESim 软件,解决了软件自带模块无法准确预测预冷换热规律的挑战,与液氮预冷试验进行了对比验证,结果表明所建立模型与试验测得预冷时间的相对误差小于 6.0%,能够反映低温预冷的降温规律。

(3)对典型工况的涡轮泵预冷结果表明,芯体预冷远快于壳体,芯体预冷耗时仅为壳体的 3.7%,泵壳预冷耗时决定了涡轮泵整体预冷进程;提高涡轮泵入口压力可减少预冷耗时,当入口压力由 0.2 MPa 提高至 0.3 MPa 时,预冷耗时减少 26.2%,但预冷过程的液体消耗量增加了 13.7%。

## 参考文献:

- [1] 刘刚毅. 低温发动机氢系统预冷仿真研究 [D]. 北京: 中国运载火箭技术研究院, 2019.
- [2] 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.
- [3] DARR S R, HU Hong, GLIKIN N G, et al. An experimental study on terrestrial cryogenic transfer line chilldown: I effect of mass flux, equilibrium quality, and inlet subcooling [J]. International Journal of



- Heat and Mass Transfer, 2016, 103: 1225-1242.
- [4] DARR S R, HU Hong, GLIKIN N, et al. An experimental study on terrestrial cryogenic tube chilldown; II effect of flow direction with respect to gravity and new correlation set [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2016, 103: 1243-1260.
- [5] CHUNG J N, DONG Jun, WANG Hao, et al. An advance in transfer line chilldown heat transfer of cryogenic propellants in microgravity using microfilm coating for enabling deep space exploration [J]. NPJ Microgravity, 2021, 7(1): 21.
- [6] CHUNG J N, DARR S R, DONG Jun, et al. Heat transfer enhancement in cryogenic quenching process [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2020, 147: 106117.
- [7] CHUNG J N, DONG Jun, WANG Hao, et al. Enhancement of convective quenching heat transfer by coated tubes and intermittent cryogenic pulse flows [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, 141: 256-264.
- [8] HARTWIG J, MEYERHOFER P, STIEGEMEIER B, et al. Liquid methane and liquid oxygen horizontal chilldown experiments of a 2.54 and 11.43 cm transfer line [J]. Applied Thermal Engineering, 2022, 205: 118042.
- [9] MOHAMMED J, MOHIZIN A, ROY K E R. Experimental investigations on transient cryogenic chilldown of a short horizontal copper transfer line [J]. Sādhanā, 2020, 45(1): 12.
- [10] VENKATESH N, KUMAR AGARWAL D, SALIH A, et al. Chilldown of cryogenic feed lines-an insight into the influence of feed line orientation and mass flux [J]. Cryogenics, 2023, 130: 103644.
- [11] JIN Lingxue, LEE J, JEONG S. Investigation on heat transfer in line chill-down process with various cryogenic fluids [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2020, 150: 119204.
- [12] JIN Lingxue, PARK C, CHO H, et al. Experimental investigation on chill-down process of cryogenic flow line [J]. Cryogenics, 2016, 79: 96-105.
- [13] ZHANG Jiaqi, WANG Ke, CHEN Lanwei. Experimental study on liquid oxygen chill-down in a horizontal exit-contracted pipe [J]. Cryogenics, 2021, 120: 103387.
- [14] ZHANG Jiaqi, WANG Ke, CHEN Lanwei. Fill-in and boiling transition characteristics during the liquid oxygen chill-down process in a vertical exit-contracted pipe [J]. International Journal of Aerospace Engineering, 2022, 2022(1): 5899199.
- [15] CHEN Lanwei, ZHANG Jiaqi. Characteristics of flow development and boiling transitions in the liquid oxygen chill-down process in a straight horizontal exit-contracted pipe [J]. International Journal of Aerospace Engineering, 2023, 2023(1): 9088200.
- [16] 黄晓宁. 低温液体大温差预冷两相流型演变机制及管路快速降温规律 [D]. 西安: 西安交通大学, 2021.
- [17] 王娇娇. 火箭低温推进剂地面加注与在轨传输过程两相传热特性研究 [D]. 西安: 西安交通大学, 2021.
- [18] DARR S R, HARTWIG J W, DONG J, et al. Two-phase pipe quenching correlations for liquid nitrogen and liquid hydrogen [J]. Journal of Heat Transfer, 2019, 141(4): 042901.
- [19] DARR S, HU Hong, SCHAEFFER R, et al. Numerical simulation of liquid nitrogen chilldown of a vertical tube [EB/OL]. (2015-01-05) [2025-03-13]. <https://ntrs.nasa.gov/citations/20150011066>.
- [20] JIN Lingxue, CHO H, LEE C, et al. Experimental research and numerical simulation on cryogenic line chill-down process [J]. Cryogenics, 2018, 89: 42-52.
- [21] LIAO Jun, MEI Renwei, KLAUSNER J F. A film boiling model for cryogenic chilldown at low mass flux inside a horizontal pipeline [J]. Heat and Mass Transfer, 2006, 42(10): 891-900.
- [22] LIAO Jun. Modeling two-phase transport during cryogenic chilldown in a pipeline [D]. Gainesville, USA: University of Florida, 2005.
- [23] JAYACHANDRAN K, NARAYANAN, CHIRAG R K. Three-dimensional CFD simulations in the film boiling regime during liquid nitrogen chilldown process [EB/OL]. (2024-01-12) [2025-03-01]. <https://ntrs.nasa.gov/citations/20230017400>.
- [24] 施轶炜, 王文, 匡以武, 等. 低温输运管道的液氮预冷过程仿真分析 [J]. 低温与超导, 2021, 49(11): 79-87.
- [25] SHI Yiwei, WANG Wen, KUANG Yiwu, et al. Simulation of cryogenic pipeline chill-down with liquid nitrogen [J]. Cryogenics & Superconductivity, 2021, 49(11): 79-87.
- [25] 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.
- [26] LECLAIR A C, MAJUMDAR A K. Computational model of the chilldown and propellant loading of the space shuttle external tank [C]//46th AIAA/ASME/

- SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, Reston, VA, USA; AIAA, 2010; AIAA 2010-6561.
- [27] 陈士强, 范瑞祥, 黄兵, 等. 液体运载火箭低温动力系统注气式循环预冷过程的 AMESim 仿真研究 [J]. 载人航天, 2014, 20(5): 413-420.
- CHEN Shiqiang, FAN Ruixiang, HUANG Bing, et al. Simulation research on gas injection circulation precooling to cryogenic launch vehicle propulsion system with AMESim [J]. Manned Spaceflight, 2014, 20(5): 413-420.
- [28] 黄兵, 李东, 张树杰, 等. 氢强迫循环预冷的系统仿真研究 [J]. 深空探测学报(中英文), 2021, 8(4): 399-406.
- HUANG Bing, LI Dong, ZHANG Shujie, et al. Simulation study of forced circulation pre-cooling for hydrogen [J]. Journal of Deep Space Exploration, 2021, 8(4): 399-406.
- [29] 曾锐锐. 低温流体传输管预冷过程的两相流动与传热耦合数值研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2020.
- [30] 卜学兵, 郑旭, 韩飞, 等. 涡轮氧泵动静间隙低温介质热力学特性研究 [J]. 工程热物理学报, 2023, 44(9): 2399-2408.
- BU Xuebing, ZHENG Xu, HAN Fei, et al. Research on thermodynamic characteristics of cryogenic medium in rotor-stator cavities of liquid oxygen turbopump [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2023, 44(9): 2399-2408.
- [31] CHEN J C. Correlation for boiling heat transfer to saturated fluids in convective flow [J]. Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development, 1966, 5(3): 322-329.
- (编辑 亢列梅)