

DOI: 10.7652/xjtuxb201901012

低温管路预冷过程两相流动与换热计算研究

王娇娇¹, 陈虹², 厉彦忠^{1,2}, 王磊¹, 李翠¹

(1. 西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安; 2. 航天低温推进剂技术国家重点实验室, 100028, 北京)

摘要: 为揭示低温流体预冷管路过程中两相流动与换热特性,采用准稳态方法建立了低温管路预冷计算模型。该模型采用有限容积法来求解管内流体流动与换热方程,有限差分法求解管壁一维非稳态导热方程,流体与壁面的换热根据流型来判定选择对应的换热关联式,并对管壁外侧辐射漏热进行线性化离散处理。利用多组实验数据进行模型验证,结果表明模型对预冷时间预测的误差在 10% 之内。对预冷过程非稳态降温特性及流型与换热特性的计算结果表明:在低温流体预冷管路过程中,大部分换热方式为单相气强制对流和膜态沸腾,约占总预冷时间的 95%,总换热量的 75%,核态和过渡沸腾发生时间较短;预冷过程中存在一个最优质量流速,这既可以缩短预冷时间,同时可以减少推进剂的浪费。

关键词: 低温推进剂;真空管路;预冷降温;数值模拟;气液两相流

中图分类号: V511.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2019)01-0093-07

Research on the Two-Phase Flow and Heat Transfer Characteristics of Cryogenic Pipeline Chill-Down Process

WANG Jiaojiao¹, CHEN Hong², LI Yanzhong^{1,2}, WANG Lei¹, LI Cui¹

(1. School of Energy and Power Engineering, Xian Jiaotong University, Xian 710049, China;

2. State Key Laboratory of Technologies in Space Cryogenic Propellants, Beijing 100028, China)

Abstract: To reveal the two-phase flow and heat transfer characteristics during the chill-down process of cryogenic fluid, a chill-down model was established with the quasi-steady-state method. In the model, the finite volume method was used to solve the fluid flow and heat transfer equation in the pipe, and the finite difference method was used to solve the one-dimensional unsteady heat transfer equation of the pipe wall. The heat transfer between fluid and the wall was calculated by appropriate heat transfer correlations, and the radiant heat in the pipe was linearized. The model was validated by the experimental data in literatures, and the results showed that the error of the model for chill-down time prediction is within 10%. The calculation results of the unsteady flow pattern and heat transfer characteristics of the chill-down process indicated that the single-phase gas forced convection and film boiling heat transfer occupy the most of chill-down process, accounting for about 95% of the total chill-down time and 75% of the total heat exchange flux. There is an optimal mass flow rate during the chill-down process, which can shorten the chill-down time and reduce the consumption of propellant.

Keywords: cryogenic propellant; vacuum pipeline; chill-down process; numerical simulation; two-phase flow

近年来低温流体的应用日益广泛,液化天然气(LNG)、液氧(LOX)、液氮(LN₂)、液氢(LH₂)和液氦(LHe)等经常作为燃料或冷却剂广泛应用于各行业。液氢、液氧具有高比冲、大推力、无毒无污染等优点,被认为是未来深空探测的首选推进剂,然而由于其饱和温度低、气化潜热小,与外部环境温差较大,在运输及使用过程中极易发生剧烈气化。因此,在低温流体传输、加注之前需进行小流量预冷加注,将管路从室温降至低温区。在此过程中,降低预冷时间和减少低温推进剂消耗量具有重要的意义。因此,为了实现预冷过程的准确控制并最大限度地减少低温液体消耗,需对预冷过程的瞬态热传递机制开展深入研究。

由于管壁与流体温差较大、压力和速度波动剧烈以及复杂的两相流动与换热,使得相关研究面临较大挑战,低温流体预冷管路沸腾换热主要依靠实验研究。近年来,研究人员针对液氮预冷沸腾开展了大量实验研究,为减少复杂性,研究者通常把预冷沸腾的各种影响因素孤立起来进行实验,进而分析各因素对过程发展的影响和作用机制^[1]。Velat等指出质量流速是预冷过程重要的影响因素^[2-3],Hu等分别进行不同方向预冷实验,发现竖直向上管路预冷速度快于竖直向下^[4]。Shaeffer等研究了流动方式的影响,得到间歇流动方式利于减少推进剂消耗量^[5]。Hartwig等研究了工质对流动沸腾的影响^[6]。在此基础上,Darr等对液氮管路流动沸腾开展大量的实验研究,为理论分析和机理研究提供了大量数据^[7-10]。目前,预冷沸腾方面的相关理论研究较少,主要沿用传统两相流动与换热理论。Chung等建立的两流体模型在一定条件下与实验结果比较符合^[11-13]。孙恒等采用均相模型^[14-15],余红梅等采用气液同速推进分层流动模型^[16],对低温流体预冷管路过程进行预测,均取得一定进展。

综上所述,由于低温管路预冷沸腾机理的复杂性、随机性、多样性以及非稳态的发展过程,相关研究还很不充分,不确定因素和未知现象较多。因此,本文构建了有效的低温管路预冷模型,利用多个文献中的实验数据验证了模型的有效性,并对预冷过程中的流型与换热特性及非稳态降温特性开展了预测与分析。

1 控制方程

1.1 低温液体流动与换热方程

本文采用一维均相模型描述预冷过程中管内低

温流体,将气液两相处理为混合均匀的、具有平流动特性和平均物性的单一流体,假设管流为一维流动,采取准稳态描述方式,两相之间处于热、力平衡。管路中流体流动与换热的控制方程为

连续性方程

$$\frac{\partial(\rho A)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u A)}{\partial x} = 0$$

式中: ρ 为流体密度; A 为管路截面积; u 为流体速度; t 为时间; x 为管路轴向坐标。

动量方程

$$\frac{\partial(\rho u A)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u^2 A)}{\partial x} = -A \frac{\partial P}{\partial x} - \rho A f_R - \rho A g \cos \theta$$

式中: P 为压力; f_R 为摩擦因数; θ 为重力场与管流方向夹角; g 为重力加速度。

能量方程

$$\frac{\partial(\rho \gamma A)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u \gamma A)}{\partial x} = S_h$$

式中: γ 为焓值; S_h 为单元体管路壁面与低温流体间的换热量。

1.2 管壁一维非稳态导热方程

在预冷过程中,管壁温度从室温降至低温区,一维非稳态导热方程(忽略轴向导热)为

$$\rho_s c_{p,s} \frac{\partial T_w}{\partial t} = \lambda_s \left(\frac{\partial^2 T_w}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_w}{\partial r} \right)$$

式中: ρ_s 为管路壁面固体密度; $c_{p,s}$ 为管路壁面热容; λ_s 为管路壁面导热系数; T_w 为壁面温度; r 为管路径向坐标。

管路内壁面与管内流体对流换热,管路外壁面与外界环境换热,内外壁面边界方程分别为

$$\lambda_s \frac{\partial T_w}{\partial t} + h_{\text{conv}} (T_f - T_w) = 0$$

$$\lambda_s \frac{\partial T_w}{\partial t} + q_{\text{par}} = 0$$

式中: h_{conv} 为内壁面与流体之间换热系数; q_{par} 为外界环境漏热流。

1.3 真空绝热管路的漏热计算

真空绝热管路的外界环境漏热包括辐射换热和残余气体导热两部分,其中辐射换热可根据斯蒂芬-玻尔兹曼方程计算,即

$$q_{\text{rad}} = \epsilon \sigma_{\text{SB}} (T_{w,\text{vac}}^4 - T_w^4) \varphi$$

式中: q_{rad} 为辐射换热量; σ_{SB} 为斯蒂芬-玻尔兹曼常量; φ 为相对辐射的角系数,可取 $\varphi = 1$; $\epsilon = \left[\frac{1}{\epsilon_{w,\text{tube}}} + \frac{1 - \epsilon_{w,\text{tube}}}{\epsilon_{w,\text{vac}}} \left(\frac{d + 2t_{\text{tube}}}{d_{\text{vac}}} \right) \right]^{-1}$ 为综合发射率,其

中 $\epsilon_{w,\text{tube}}$ 为真空夹层内表面的发射率, $\epsilon_{w,\text{vac}}$ 为真空夹

层外表面的发射率, d 为管路直径, d_{vac} 为真空室外壁直径, t_{tube} 为管路壁面厚度。

残余气体导热根据下式进行计算

$$q_{\text{gc}} = k\beta P_{\text{vam}}(T_{\text{w,vac}} - T_{\text{w}})$$

式中: q_{gc} 为残余气体导热量; P_{vam} 为真空夹层中的压力; $\alpha = \left[\frac{1}{\alpha_{\text{w,tube}}} + \frac{d}{d + 2t_{\text{tube}}} \left(\frac{1}{\alpha_{\text{w,vac}}} - 1 \right) \right]^{-1}$ 为热适应系数;

$k = \frac{\tau + 1}{\tau - 1} \sqrt{\frac{R}{8\pi MT}}$ 为气体的自由分子导热系数, 其中 τ 为比热容比, R 为理想气体常数, M 为分子质量。

1.4 管壁与流体间的换热计算

图 1 展示了不同文献中液氮预冷沸腾曲线的实验数据, 由图 1 可知, 不同工况的实验结果具有相同趋势, 随着壁面过热度的降低, 膜态沸腾起始温度 T_{MFB} 、临界热流 CHF、核态沸腾起始温度 T_{ONB} 这 3 个特征点将流体与管壁间换热依次分为膜态沸腾、过渡沸腾、核态沸腾、单相强制对流 4 种方式。

由于低温流体物性的特殊性和预冷过程的复杂性, 相关研究面临较大挑战。Hartwig 等将多个低温预冷实验数据与传统经验关联式进行比较^[17], 发

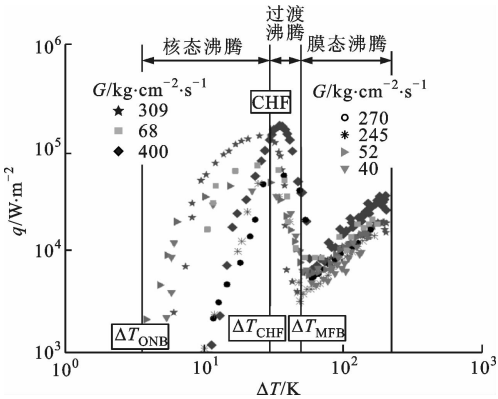


图 1 液氮管路预冷过程沸腾曲线

现所有模型与实验数据的误差都非常大, 不能预测低温流体预冷管过程的换热特性。

基于文献中液氮预冷管路的实验数据, 本文对 3 个特征点和 4 种换热方式的模型分别进行选择, 选择结果及与实验数据的对比情况如表 1 所示。

预冷过程中管内流体依次经历单相气体强制对流、膜态沸腾、过渡沸腾、核态沸腾和单项液体强制对流, 不同换热方式分别采用不同公式计算换热系

表 1 管壁与低温流体间传热模型

工况	选用模型	关联式形式	实验数据点	误差分析
临界热流	修正 Katto ^[18]	$q_{\text{CHF}} = 0.486 G_1 \gamma_{\text{lv}} \left(\frac{\rho_{\text{g}}}{\rho_{\text{l}}} \right)^{0.6353} \left(\frac{\rho_{\text{g}} \sigma}{G_1^2 L} \right)^{0.4987} \left(\frac{L}{d} \right)^{0.3112}$	95 ^[7,9-10,19-20]	30%之内
膜态沸腾最小温度	Jin ^[21]	$T_{\text{MFB}} = \frac{T_{\text{cr}} - T_{\text{sat}}}{K \sqrt{\mu_{\text{f}}}} (1 + \beta) + T_{\text{sat}} \quad \beta = \sqrt{\frac{(\lambda \rho c_{\text{p}})_{\text{f}}}{(\lambda \rho c_{\text{p}})_{\text{w}}}} \quad K = 76.46$	15 ^[9,22]	10%之内
核态沸腾起始温度	Darr ^[22]	$T_{\text{ONB}} = T_{\text{sat}}(P) + 0.0071P + 5$	20 ^[7,9-10]	30%之内
膜态沸腾	Darr ^[8]	$h_{\text{fb}} = h_{\text{b}} + h_{\text{tc}} + h_{\text{dw}} \quad h_{\text{b}} = c_1 \left[\frac{\rho_{\text{g}}(\rho_{\text{f}} - \rho_{\text{g}}) g \gamma_{\text{lv}} \lambda_{\text{g}}^3}{4 L \mu_{\text{g}} (T_{\text{i}} - T_{\text{f,sat}})} \right]^{1/4}$ $h_{\text{tc}} = c_2 \left[1 + \left(\frac{d}{L + 0.1d} \right)^{0.7} \right] \left(\frac{\lambda_{\text{g}}}{d} \right) (1 - x)^{c_3} Re_{\text{g}}^4 Pr_{\text{g}}^{0.4}$ $h_{\text{dw}} = c_5 \left(\frac{\lambda_{\text{f}}}{d} \right) \exp \left[- \left(\frac{L}{d} \right)^{c_6} \right] We_{\text{f}}^{c_7} Ja_{\text{f}}^{-1}$	200 ^[8,10,13,20,23]	G = 20~1 000 kg/(m²·s) 趋势相同
过渡沸腾		差值计算		
核态沸腾	Chen ^[24]	$h_{\text{nb}} = E h_{\text{s}} + S h_{\text{p}} \quad S = 0.9622 - 0.5833 \left[\arctan \left(\frac{Re_1 E^{1.25}}{61800} \right) \right]$ $E = \left(1 + \frac{1}{x_{\text{tt}}^{0.5}} \right)^{1.78} \left(\frac{Pr_1 + 1}{2} \right)^{0.44} \quad h_{\text{s}} = 0.023 (Re_1)^{0.8} (Pr_1)^{0.4} \frac{\lambda_{\text{l}}}{d_{\text{h}}}$ $h_{\text{p}} = 0.00122 \frac{\lambda_{\text{l}}^{0.97} c_{\text{pl}}^{0.45} \rho_{\text{l}}^{0.49} \Delta T_{\text{sat}}^{0.24} \Delta P_{\text{sat}}^{0.75}}{\sigma^{0.5} \mu_{\text{l}}^{0.29} \gamma_{\text{lv}}^{0.21} \rho_{\text{v}}^{0.24}}$ $Re_1 = \frac{\rho_{\text{l}} u_{\text{l}} d_{\text{h}} (1 - x)}{\mu_{\text{l}}} \quad Pr_1 = \frac{c_{\text{pl}} \mu_{\text{l}}}{k_{\text{l}}} \quad X_{\text{tt}} = \left(\frac{1 - x}{x} \right)^{0.9} \left(\frac{\rho_{\text{l}}}{\rho_{\text{v}}} \right)^{0.5} \left(\frac{\mu_{\text{l}}}{\mu_{\text{v}}} \right)^{0.1}$	100 ^[6-7,9]	趋势相同
强制对流	Dittus-Boelter ^[25]	$h_{\text{DB}} = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} \frac{\lambda}{d} \quad h_{\text{DB}} = 0.023 Re_{\text{f}}^{0.8} Pr_{\text{f}}^{0.4} \left(\frac{T_{\text{f}}}{T_{\text{w}}} \right)^{0.5} \frac{\lambda_{\text{f}}}{d}$		

注: G 为质量流速; μ 为黏度; σ 为表面张力; x 为热力学含气率; 下角标 l 为液体, g 为气体, f 为流体, w 为壁面, i 为节点, sat 为饱和状态, cr 为临界状态, fb 为膜态沸腾, nb 为核态沸腾; $We_{\text{f}} = G^2 d / (\rho \sigma)$; $Ja_{\text{f}} = c_{\text{p}} (T_{\text{wi}} - T_{\text{f,sat}}) / h_{\text{fg}}$

数,如图2所示。若质量含气率大于1或小于0,则流体与壁面间为单相强制对流换热,采用 Dittus-Boelter 公式或修正的公式。若质量含气率处于0与1之间,则流体与壁面处于两相换热方式。此时根据流量、压力等参数计算膜态沸腾起始点温度 T_{MFB} 和核态沸腾起始点温度 T_{ONB} ,若壁面温度 T_w 大于 T_{MFB} ,则处于膜态沸腾区域,采用 Darr 膜态沸腾换热公式;若壁面温度 T_w 小于 T_{ONB} ,则使用 Dittus-Boelter 公式进行计算;若壁面温度 T_w 处于 T_{ONB} 与 T_{MFB} 之间,则流体与壁面之间换热为核态沸腾或过渡沸腾,通过 Chen 公式计算 q_{NB} ,修正的 Katto 公式计算 q_{CHF} ,若 q_{NB} 小于 q_{CHF} ,则处于核态沸腾,采用 Chen 公式;若 q_{NB} 大于 q_{CHF} ,则处于过渡沸腾,采用插值计算。

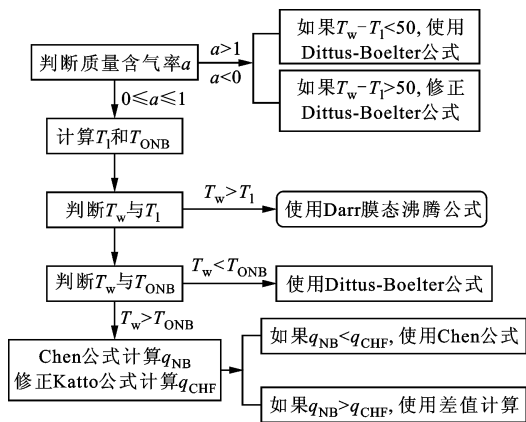


图2 换热模型选择及判定条件

2 计算模型

针对低温流体预冷真空管路过程的管壁瞬态降温特性,采用有限容积法耦合求解管内流体流动与换热方程,有限差分法求解管壁一维非稳态导热方程,流体与壁面的换热通过流型判定及多种换热模型的恰当选用予以考虑,管壁外侧辐射漏热进行线性化离散处理。

2.1 离散化处理

将管路内流体沿长度方向划分节点,管壁沿长度方向和径向均划分节点,离散节点分布如图3所示,其中 q_{cov} 表示壁面与流体之间换热量。流体流动换热采用有限容积方法进行计算,将含有四次项的辐射热进行泰勒展开,并采用有限差分的方法计算管壁非稳态导热,利用准稳态换热的方法将流固换热以及外界环境漏热进行耦合求解。

热力学含气率 x 计算式为

$$x = \frac{\gamma_i - \gamma_{\text{l,sat}}}{\gamma_{\text{lv}}}$$

式中: γ_i 为节点 i 处的焓值; $\gamma_{\text{l,sat}}$ 为饱和液焓; γ_{lv} 为当前压力下的相变潜热。

每一时刻的流体节点处焓值 γ_i 计算式为

$$\gamma_i = \gamma_{i-1} + 4q_{i-1}/(\pi d^2 G)$$

式中: γ_{i-1} 为上一节点焓值; q_{i-1} 为上一节点处流体与壁面换热量。

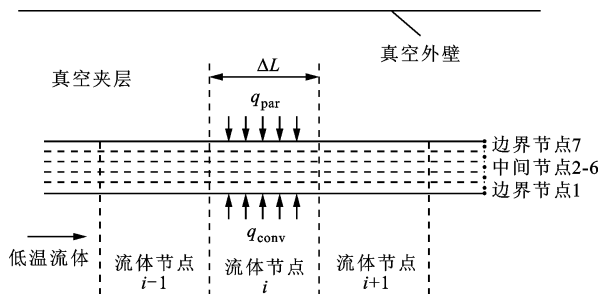


图3 数值模拟离散节点分布

2.2 耦合换热计算

在低温流体预冷真空管路过程中,首先应该判断各节点低温流体与壁面的传热工况,确定流体与壁面间换热量,进而计算出节点处的温度、流速及含气率等流动参数,并计算管壁的温度分布,程序流程如图4所示。

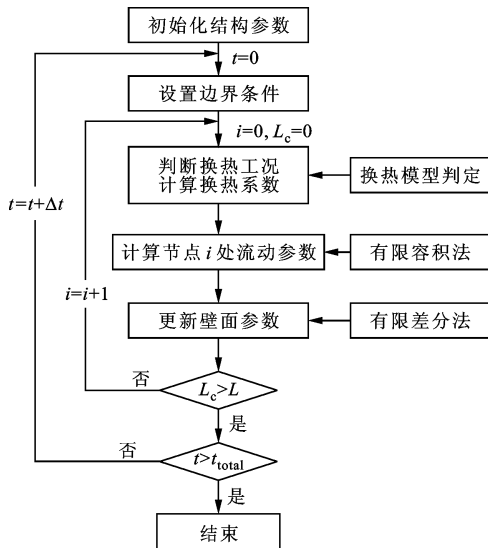


图4 程序流程图

2.3 模型验证

基于上述计算模型,对文献[9]和文献[22]中液氮预冷真空管路的9个实验工况开展计算分析,实验条件如表2所示,其中流动方向包括水平和竖直向下两个方向,9个实验工况的质量流速各不相同。

9个实验工况中预冷时间的实验数据与计算结果的对比情况如图5所示,由图9可知,对预冷时间的预测误差在10%之内,说明本文建立的预冷模型

表 2 管路预冷实验工况条件

来源	管路尺寸	绝热方式	流动方向	质量流速/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$	入口温度/K	入口压力/ MPa
文献[9]	$d_{\text{out}}=12.70\text{ mm}$ $d_{\text{in}}=10.20\text{ mm}$ $L=7\ 000\text{ mm}$	真空绝热	水平方向	18	78	0.17
				39	78	0.25
				43	78	0.29
				48	78	0.31
				58	78	0.38
				67	78	0.43
文献[22]	$d_{\text{out}}=12.70\text{ mm}$ $d_{\text{in}}=11.68\text{ mm}$ $L=572.0\text{ mm}$	真空绝热	竖直向下	126	82	0.18
				220	82	0.25
				342	82	0.42

具有较高精度,可用于液氮和液氧(两者物性非常接近)预冷管路的模拟计算中。

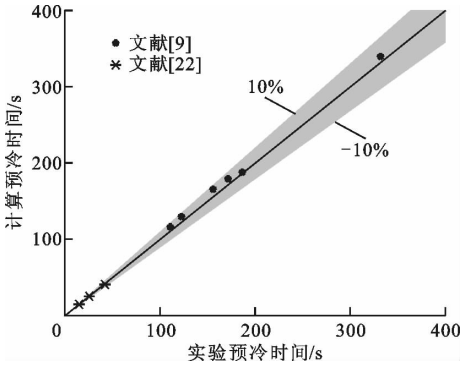


图 5 实验数据与计算结果对比

3 管路预冷流型与换热预测及分析

针对文献[9]中 $G=43\text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 的实验工况,对管路预冷过程中换热特性及流型分布进行预测。

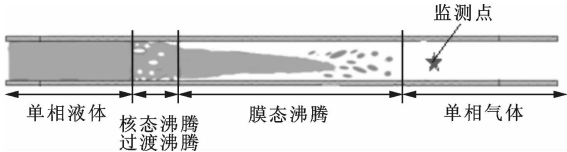
3.1 流型与换热特性分析

70 s 时刻管路预冷流型和换热特性情况如图 6 所示。由图 6 可知:在 70 s 时,沿管长方向流型依次为单相液、泡状流、反环状流、单相气,发生的换热方式依次为单相液体强制对流、核态沸腾、过渡沸腾、膜态沸腾及单相气体强制对流;核态沸腾和过渡沸腾换热系数远大于其他换热方式,发生核态和过渡沸腾时,管路中的含气率迅速增大,同时核态、过渡沸腾换热区域远小于膜态沸腾换热区域。

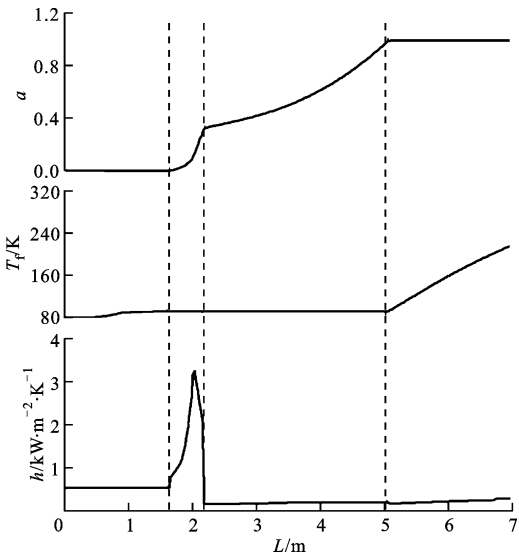
3.2 管壁非稳态温降特性

管路监测点处流体与壁面温度随时间的变化情况如图 7 所示。由图 7 可知:首先经历全气相强制对流,壁面温度和流体温度逐渐降低,随后进入膜态沸腾换热,当壁面温度降低为膜态沸腾起始温度时,换热方式变为过渡和核态沸腾,壁面温度大幅降低,随后进入全液相强制对流阶段,直至预冷完成;预冷

过程大部分时间为全气相和膜态沸腾阶段,大约占预冷时间的 95% 以上,核态沸腾和过渡沸腾持续时间很短。



(a)管路预冷流型分布



(b)换热特性分布

图 6 典型时刻管路预冷流型分布及换热特性

进一步分析整个管路壁面降温特性,沿管路长度方向不同位置处流体温度随时间变化情况和壁面温度随时间变化如图 8、图 9 所示。每个区域中壁面温度随时间及位置以相同规律变化,这是因为相同的换热区域具有相近的换热特性。

此外,距离管路入口 2 m 内的管路区域,主要发生膜态沸腾,膜态沸腾换热将壁面温度冷却至约 130 K,之后核态和过渡沸腾将壁面冷却至流体温度附近。距入口 2 m 之后的管路区域,先经历气相

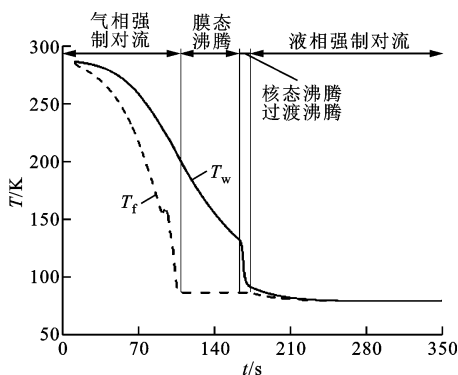


图7 特定位置处流体与壁面温度随时间变化规律

强制对流,壁面温度降至200 K左右,之后发生膜态沸腾换热,壁面降至130 K附近,最后发生核态、过渡沸腾。由图9可知,壁面温度降低过程的换热量主要通过气相强制对流换热和膜态沸腾,约占总换热量75%。

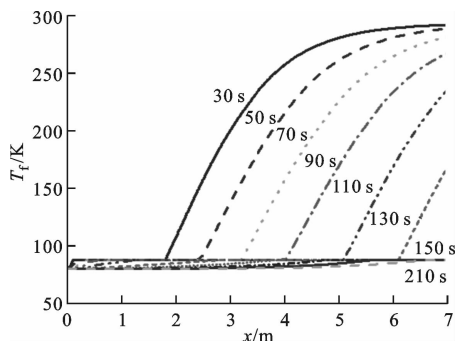


图8 流体温度随时间变化规律

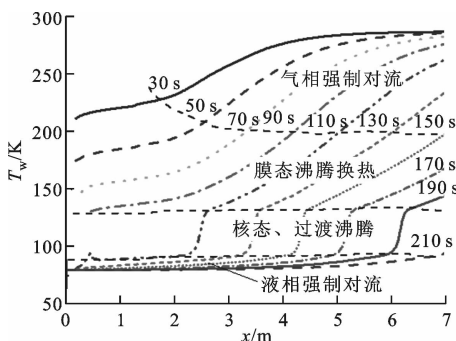


图9 壁面温度随时间变化规律

3.3 质量流速影响分析

为缩短预冷时间同时减少推进剂消耗量,以长度为10 m的管路为模型,将质量流速对预冷过程的影响进行计算分析。质量流速在 $50 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$ 和 $500 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$ 的范围内,预冷完成时间随质量流速的变化情况如图10所示。由图10可知,质量流速越大,预冷完成时间越短,在低质量流速范围内,预冷完成时间随质量流速的增加而急剧降低,当质量流速增加到一定程度后,预冷完成时间

趋于平稳。因此,预冷过程中存在一个最优质量流速,既可以缩短预冷时间,同时也可以减少推进剂的浪费。

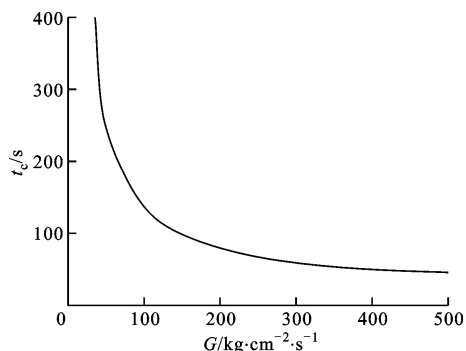


图10 不同质量流速条件下的预冷时间

4 结论

通过对低温流体预冷管路过程进行计算分析,本文得到如下结论:

(1)本文建立的低温流体预冷真空管路的非稳态计算模型,考虑了预冷过程中多种换热方式,在开展低温流体预冷管路过程预测时具有较高精度,对预冷时间预测的误差在10%之内;

(2)在低温流体预冷管路过程中,不同换热方式的换热情况差异很大,其中核态沸腾与过渡沸腾换热方式的换热系数与其他换热方式相比约大一个数量级;

(3)在低温流体预冷管路过程中,大部分时间的换热方式为单相气强制对流和膜态沸腾,约占总预冷时间的95%,总换热量的75%,核态和过渡沸腾发生时间较短;

(4)质量流速是影响预冷完成时间的重要因素,在低质量流速时,预冷时间随质量流速的增加而迅速降低,当增加到一定程度时,预冷时间趋于平稳。

参考文献:

- [1] 王娇娇, 厉彦忠, 王鑫宝, 等. 低温推进剂管路预冷沸腾换热特性研究综述 [J]. 宇航学报, 2017, 38(8): 68-78.
- WANG Jiaojiao, LI Yanzhong, WANG Xinbao. Review of cryogenic boiling heat transfer during pipe chilldown [J]. Journal of Astronautics, 2017, 38(8): 68-78.
- [2] VELAT C J. Experiments in cryogenic two phase flow [D]. Gainesville, FL, USA: University of Florida, 2004: 60-70.
- [3] VELAT C, JACKSON J, KLAUSNER J F, et al.

- Cryogenic two-phase flow during chilldown [C] // ASME 2004 Heat Transfer/Fluids Engineering Summer Conference. New York, USA: ASME, 2004: 717-722.
- [4] HU H, CHUNG J N, AMBER S H. An experimental study on flow patterns and heat transfer characteristics during cryogenic chilldown in a vertical pipe [J]. *Cryogenics*, 2012, 52(4/5/6): 268-277.
- [5] SHAEFFER R, HU H, CHUNG J N. An experimental study on liquid nitrogen pipe chilldown and heat transfer with pulse flows [J]. *International Journal of Heat & Mass Transfer*, 2013, 67(6): 955-966.
- [6] HARTWIG J, HU H, STYBORSKI J, et al. Comparison of cryogenic flow boiling in liquid nitrogen and liquid hydrogen chilldown experiments [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2015, 88: 662-673.
- [7] DARR S R, HU H, 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.
- [8] DARR S R, HU H, GLIKIN N G, 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.
- [9] JIN L, PARK C, CHO H, et al. Experimental investigation on chill-down process of cryogenic flow line [J]. *Cryogenics*, 2016, 79: 96-105.
- [10] JOHNSON J, SHINE S R. Transient cryogenic chill down process in horizontal and inclined pipes [J]. *Cryogenics*, 2015, 71: 7-17.
- [11] CHUNG J. Cryogenic two-phase flow and boiling heat transfer during pipe chilldown [C] // 37th AIAA Thermophysics Conference. Reston, VA, USA: AIAA, 2004: 2175.
- [12] LIAO J. Modeling two-phase transport during cryogenic chilldown in a pipeline [D]. Gainesville, FL, USA: University of Florida, 2005.
- [13] YUAN K, JI Y, CHUNG J N. Cryogenic chilldown process under low flow rates [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2007, 50(19): 4011-4022.
- [14] 孙恒, 徐烈, 李兆慈, 等. 低温液体输送过程中的参数计算与分析 [J]. *低温与超导*, 2000, 28(4): 39-45. SUN Heng, XU Lie, LI Zhaoqi. The analysis and calculation of the cryogenic liquid in transporting process [J]. *Cryogenics and Superconductivity*, 2000, 28(4): 39-45.
- [15] 高芳, 陈阳, 张振鹏. 低温液体推进剂充填管路的数值模拟 [J]. *航空动力学报*, 2007, 22(1): 108-113. GAO Fang, CHEN Yang, ZHANG Zhenpeng. Numerical simulation of filling pipe of cryogenic liquid propellant [J]. *Journal of Aerospace Power*, 2007, 22(1): 108-113.
- [16] 余红梅, 李兆慈, 孙恒. 水平管道预冷过程研究 [J]. *低温与特气*, 2009, 42(9): 16-21. YU Hongmei, LI Zhaoqi, SUN Heng. Research on pre-cooling of LNG transfer pipeline [J]. *Low Temperature and Specialty Gases*, 2009, 42(9): 16-21.
- [17] HARTWIG J, DARR S, ASENCIO A. Assessment of existing two phase heat transfer coefficient and critical heat flux correlations for cryogenic flow boiling in pipe quenching experiments [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2016, 93: 441-463.
- [18] KATTO Y, KURATA C. Critical heat flux of saturated convective boiling on uniformly heated plates in a parallel flow [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 1980, 6(6): 575-582.
- [19] YUAN K, YAN J, CHUNG J N. Cryogenic chill-down process under low flow rates [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2007, 50(19): 4011-4022.
- [20] KAWANAMI O, NISHIDA T, HONDA I, et al. Flow and heat transfer on cryogenic flow boiling during tube quenching under upward and downward flow [J]. *Microgravity Science and Technology*, 2007, 19(3/4): 137-138.
- [21] JIN L, CHO H, LEE C, et al. Experimental research and numerical simulation on cryogenic line chill-down process [J]. *Cryogenics*, 2018, 89: 42-52.
- [22] DARR S R, HU H, SHAEFFER R, et al. Numerical simulation of the liquid nitrogen chilldown of a vertical tube [C] // AIAA Aerospace Sciences Meeting. Reston, VA, USA: AIAA, 2015: 1-13.
- [23] JACKSON J K. Cryogenic two-phase flow during chilldown: flow transition and nucleate boiling heat transfer [D]. Gainesville, FL, USA: University of Florida, 2006: 57-90.
- [24] CHEN Y. Heat transfer in film boiling of flowing water [M]. Intech Open Access Publisher, 2011.
- [25] 杨世铭, 陶文铨. 传热学 [M]. 4版. 北京: 高等教育出版社, 2006: 246-249.

(编辑 赵炜)