

液体火箭发动机自然循环回路预冷非稳态数学模型

陈二锋, 厉彦忠, 程向华, 余锋

(西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 针对液体火箭发动机自然循环回路预冷过程中的非稳态流动与传热问题, 构建了一组涵盖主要传热工况的管壁与低温流体间的传热模型, 耦合了循环回路的释热方程和低温流体间的流动传热方程, 并采用二分法迭代求解自然循环回路预冷过程中的非稳态循环流量, 建立了液体火箭发动机自然循环回路预冷的一维非稳态均相流动数学模型. 与已有传热模型相比, 在膜态沸腾阶段引入了反环状流膜态沸腾模型和弥散流膜态沸腾模型, 保证了膜态沸腾从全液相到全气相过渡过程中物理意义上的逻辑自洽性, 并以输送管为例, 验证了液体火箭发动机自然循环回路预冷模型的有效性.

关键词: 液体火箭发动机; 自然循环; 回路预冷; 膜态沸腾

中图分类号: V434.14 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2008)09-1127-05

Unsteady Mathematic Models of Natural Circulation Loop Precooling of Liquid Rocket Engine

CHEN Erfeng, LI Yanzhong, CHENG Xianghua, YU Feng

(School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The heat transfer models between the pipe wall and the cryogenic liquid were established to investigate the unsteady flow and heat transfer process of a natural circulation loop precooling of a liquid rocket engine. The models couple the heat release equation of the circulation loop and the flow and heat transfer equations of the cryogenic liquid. Moreover, the one-dimensional unsteady homogenous flow mathematic models were set up and solved with the bisection method to obtain the unsteady flow rate of the natural circulation loop. Unlike the existing precooling models, both the inverted annular model and the dispersed model are adopted in the prediction of filming boiling, which ensures the logicity integrity of the transition from full liquid region to full gas region. In addition, the unsteady precooling models of the natural circulation loop of a liquid rocket engine were validated by the calculation of a supply pipe.

Keywords: liquid rocket engine; natural circulation; loop precooling; filming boiling

自然循环回路预冷是伴随着低温液体火箭发展起来的一种新型预冷方法, 它利用了推进剂在两垂直管路中的密度差所引起的自发性流动预冷过程, 具有节省推进剂的预冷消耗量、简化火箭射前程序、增加预冷安全系数和实现延迟点火功能等特点, 是火箭发动机预冷技术的一种发展趋势.

国内外对液体火箭发动机自然循环回路预冷公开的研究文献相对较少, 仅文献[1]以液氮为工质开展了液体火箭发动机自然循环回路预冷的模拟实验研究, 实验分析了回流管路直径、绝热方式及回流方法等对预冷回路的影响, 但在自然循环预冷回路的产生机理及数值计算方面基本没有涉及. 在强制

预冷管路的研究方面,国内外的研究者开展了很多有意义的工作,其流型及流动与传热特性的研究长期以来是工程技术和科技人员十分关注的课题,至今已有许多学者对此进行了研究. Laverty 和 Rohsenow 实验研究了均匀加热竖直管路中饱和液氮的膜态沸腾流动与传热过程,认为存在 2 种基本流型,即反环状流和弥散流,并在此基础上分析了相应的传热特征及其流型间转化的临界 Weber 数^[2]. Kawaji 和 Banerjee 以水为工质通过可视化实验给出了均匀加热竖直管路预冷过程中典型的流型变化,并根据预冷管路内的流型划分为 4 个不同的流动区域:全液体、反环状流(低流率时为环状流)膜态沸腾、弥散流膜态沸腾和全气体^[3]. Hedayatpour 在此基础上分析了各种流型可能存在的传热机理,并采用两流体模型计算研究了水和液氮在竖直管路中的流动与传热特性^[4]. Velat 和 Liao 等人认为:低温流体在预冷过程中先后经历膜态沸腾、核态沸腾和单相强制对流换热阶段;低温流体在水平预冷管路中流型以分层流为主,在竖直预冷管路中以均匀流为主,应分别以两流体模型和均相流模型求解. 在此基础上针对水平预冷管路中的分层流建立了二维的准稳态流动与传热模型,并数值预示了预冷过程中管壁温度的变化趋势^[5-6].

综上所述,目前许多学者在预冷管路强制流动方面开展了很多具有探索意义的工作,而在自然循环预冷回路方面却很少涉及. 本文针对液体火箭发动机预冷回路自然循环流动与传热问题,建立了一组用于计算自然循环预冷回路非稳态过程的一维均相流模型. 同时,对于自然循环预冷管路的膜态沸腾过程,由于现有的膜态沸腾关系式难以保证当传热工况转换时传热量变化的过渡特性^[7],所以本文从自然循环回路预冷过程中可能出现的流型及其传热机理入手,在膜态沸腾计算中引入反环状流膜态沸腾和弥散流膜态沸腾,使传热模型更能反映实际管路预冷过程中的流型及传热特征,从而保证了膜态沸腾从全液相向全气相过渡时其传热量的变化规律以及物理意义上的逻辑自洽性.

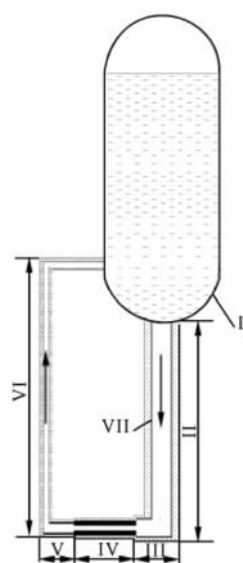
1 数学模型

1.1 物理模型

液体火箭发动机自然循环预冷示意图如图 1 所示,其自然循环回路由输送管、发动机入口至泵入口的管道、泵管道(即液体火箭发动机管路)、泵出口至

排放阀的管道和回流管 5 段管路组成,它们共同参与火箭发动机、及回路的自然循环预冷过程. 液体火箭发动机循环回路的预冷过程是十分复杂和不稳定的:在预冷开始阶段,低温流体流经常温的发动机循环回路时,由于两者间存在很大的温差使得低温流体剧烈气化,并引起较大的压力波动,低温液体在循环回路中可能在全液相、气液两相、全气相 3 种形式;随着预冷过程的进行,发动机泵体及回路的温度逐渐下降,此时流出火箭发动机的流体变成了气液两相混合物;由于预冷回路和低温流体的传热驱动力随预冷过程的进行逐渐减小,这使得回流管中气液两相流体中液相成分不断增加,自然循环回路流动的驱动力也逐渐减小;在预冷过程后期的相对稳定状态,发动机泵体及管壁温度趋于稳定,低温液体仅能通过管路壁面和泵壳表面与空气侧的对流换热来吸收热量,进而维持稳态自然循环预冷所需的驱动力;低温流体通过吸收循环回路的释热量,从而降低管路壁面及泵壳表面的温度,而在此过程中低温流体先后经历膜态沸腾、过渡沸腾、核态沸腾和单相强制对流换热阶段.

绝热层与空气间为外部强制对流换热,由于回路预冷过程中空气侧换热系数难以确定,并且在预冷过程初始阶段外侧换热量比金属壁与泵体的漏热量小得多,因此外侧的对流换热系数可采用稳态时的空气侧对流换热系数来计算. 空气侧可采用强制对流换热公式(邱吉尔-朋斯登准则公式)计算,并根据试算法^[1],先假定绝热层外表面的温度,分别采用热阻法和邱吉尔-朋斯登准则式计算空气侧的对流换热系数,当两者偏差较小时,即可求得空气侧对流换热系数及绝热层外表面的温度. 液体火箭发动机自然循环预冷回路的结构参数及稳态时绝热层外侧的换热参数如表 1 所示,管路初始温度为 288.15 K,贮箱内液氧温度为 91.837 K,气枕压力为 0.12 MPa.



I:液氧贮箱;II:输送管;
III:发动机入口至泵入口的管道;IV:泵管道;
V:泵出口至排放阀的管路;VI:回流管;VII:特征点

图1 液体火箭发动机自然循环预冷简图

表1 自然循环预冷回路的结构参数

参数	输送管	发动机入口至 泵入口的管道	泵管道 (折算值)	泵出口至排 放阀的管道	回流管
内径/mm	220	220	54	90	42
壁厚/mm	2.5	3	49	8	1.5
长度/mm	7 600	1 000	1 579	750	8 404
绝热形式	20 mm 发泡绝热	7 mm 发泡绝热	7 mm 发泡绝热	7 mm 发泡绝热	不绝热(10 mm 霜层)
材料	LF6	GH4169	GH4169	GH4169	LF6
空气侧换热系数/ $W \cdot (m^2 \cdot K)^{-1}$	10.90	11.47	13.26	15.16	20.87
绝热层外壁面温度/K	268	240	247	251	151
漏热量/W	1 388.0	417.5	450.6	161.9	5 071

1.2 控制方程

本文采用一维均相流模型描述低温液体火箭发动机自然循环回路的预冷过程,为简化计算假设:

(1)管道流动为一维流动,认为在任何一个预冷时刻循环回路处于准稳态状态但不考虑循环预冷回路中的压力波动,同时认为输送管进口处、回流管出口处的压力为该点的静压;

(2)忽略管内流体及管壁的轴向导热,金属管壁与绝热层存在径向的一维非稳态导热;

(3)气液相均匀混合,两相之间处于热力平衡。

依据上述假设可以得到描述循环回路中流动与换热的连续性方程、动量方程及能量方程分别为

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho A)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u A)}{\partial x} &= 0 \\ \frac{\partial(\rho u A)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u^2 A)}{\partial x} &= -A \frac{\partial p}{\partial x} - \rho A f_R - \rho A g \cos \theta \\ \frac{\partial(\rho h)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u h)}{\partial x} &= -p \frac{\partial u}{\partial x} + S_h \end{aligned}$$

式中: ρ 为流体密度 $\rho=\rho(p, T)$; u 为流速; A 为管路截面积; h 为流体比焓; x 为流动方向; p 为管路压力; t 为预冷时间; 摩擦因数 $f_R=\lambda u^2/(2D)$, 对于两相流压降采用 Lockhart-Martinelli 关联式计算; θ 为重力场与管流方向夹角; S_h 为单元体预冷回路与低温流体间的换热量。

金属管壁与绝热层内的一维非稳态导热方程,即循环回路的释热方程为

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda_w}{\rho_w c_w} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) - \frac{P_i}{\rho_w c_w A_w} q_w$$

式中: T 为管壁节点温度; P_i 为内侧管壁周长; A_w 为管壁截面积; q_w 为管壁传递给低温流体的热流

量; ρ_w 、 c_w 、 λ_w 分别为管壁材料的密度、比热容及导热系数。计算时考虑了预冷过程中管路材料物性随温度的变化。循环回路的释热方程和低温流体间的流动传热方程通过管壁与低温流体间的传热模型相耦合。

自然循环预冷过程中输送管进口流速的求解是计算模型中的一个难点。由于在任意个预冷时刻可认为循环回路处于准稳态状态,同时不考虑循环回路中的压力波动,因此输送管进口流速可采用二分法进行迭代求解。在每个 t 时刻,首先根据上一个时刻 $(t-\Delta t)$ 计算的输送管入口速度值 v_0 , 确定 t 时刻输送管进口速度迭代的初值区间 $[v_0 + \Delta v, v_0 - \Delta v]$, 沿循环回路依次判断各节点所处的换热阶段, 计算通过管壁传递给各节点的换热量, 并确定循环管路中各节点的摩擦压力降、重力压力降、加速压力降及各节点的压力、温度及含气率。若计算的回流管出口压力为所限定的初始条件, 则所求解的输送管进口速度为该时刻的进口速度值, 否则继续采用二分法迭代求解, 从而实现自然循环回路预冷的非稳态计算。

1.3 管壁与低温流体间传热模型

在循环回路预冷过程中,低温流体先后经历膜态沸腾、过渡沸腾、核态沸腾和单相强制对流换热阶段。膜态沸腾虽然传热能力较弱,但却是管路预冷过程中最重要的一种换热机理,约 85%~90%的管路内壁面温度下降是由膜态沸腾引起的^[4]。由于循环预冷回路中水平管路较短,主要是两侧的竖直管路,根据前述文献中的可视化实验可认为^[2-3],在回路中膜态沸腾阶段主要的流型是反环状流和弥散

流,与之相对应的换热区域可分为反环状流膜态沸腾与弥散流膜态沸腾。当含气率较小时,低温流体在加热壁面会形成完整稳定的气膜,而在流体内部形成液芯,热量通过气膜导热到液面,产生膜态蒸发,同时管壁与液芯、气膜间会存在辐射换热,这是反环状流膜态沸腾的传热机理;当含气率逐渐变大时,气液两相间增大的流速差会产生一个更大的相间拖拽力,液芯在此相间拖拽力的作用下被撕裂成较小的液芯或者液滴,从而逐步过渡到弥散流膜态沸腾,此时壁面与液滴、蒸气间的换热主要是对流换热与辐射换热;当含气率逐渐接近于1时,弥散流膜态沸腾向全气相强制对流换热过渡。反环状流膜态沸腾和弥散流膜态沸腾的引入实现了膜态沸腾从全液相到全气相的过渡,保证了传热工况转换时换热量的变化保持物理上的逻辑自洽性。反环状流膜态沸腾和弥散流膜态沸腾可分别采用修正的 Bromley^[8]公式和 Dougall-Rohsenow^[8]公式计算。

过渡沸腾是一种介于膜态沸腾与核态沸腾间不稳定的换热阶段,由于其传热的不稳定性,目前在此方面的研究较少,通常根据最大泡核或饱和沸腾传热热流密度与最低膜态沸腾热流密度间采用内插法计算该点的热流密度。核态沸腾包括过冷沸腾和饱和沸腾,是一种建立在壁面核化机理上的传热方式,目前的研究比较多,在此采用了比较成熟的 Chen 经验公式^[8]。单相强制对流换热采用经典的 Dittus-Boelter 公式。表2列出了各种传热工况所采用的传热模型及其判定条件。

2 预冷过程中传热工况的过渡及传热特征分析

根据上述所建立的数学模型,实现了液体火箭

发动机自然循环预冷回路的非稳态数值计算。下面以输送管为例,分析其在非稳态预冷过程中的传热工况过渡特性及其传热特征。从图2可以看出:在预冷初始阶段,输送管的传热工况涵盖了单相液体强制对流换热、核态沸腾、过渡沸腾和膜态沸腾4种典型的传热工况;随预冷过程的进行,核态沸腾起始点和膜态沸腾起始点逐渐后移,单相液体强制对流换热区域增大,而膜态沸腾换热控制区减小;在180 s左右时膜态沸腾控制区域逐渐消失,输送管内存在单相液体强制对流换热、核态沸腾和过渡沸腾3种传热工况,并最终向单相液体强制对流换热过渡。

图3表示选取输送管路上任意点为特征点(在此选取输送管路中间位置,见图1),研究其在预冷过程中内壁面温度的变化规律及其相应传热工况的过渡曲线。从图3可以看出:在自然循环预冷过程中,该特征点依次经历了4个典型阶段,即膜态沸腾、过渡沸腾、核态沸腾以及单相液体强制对流换热,其中膜态沸腾是预冷过程中最重要的一种传热机理,约80%的管路内壁面温度下降是由膜态沸腾引起的;预冷开始阶段,由于特征点处内壁面温度高于膜态沸腾起始点温度 T_L ,并且当地的质量含气率大于0.1,处于弥散流膜态沸腾;随着预冷过程的进行,该特征点处的质量含气率逐渐减小,约在112 s时该点的质量含气率开始小于0.1,从而过渡到反环状流膜态沸腾;反环状流膜态沸腾所经历的时间较长,约在158 s左右时金属内壁面温度开始低于膜态沸腾起始温度,处于过渡沸腾,随着壁面过热度的减小,热流密度逐渐增大,而当壁面过热度降低到欠热或饱和流体泡核沸腾传热的最高壁面过热度 ΔT_{CHF} 时,可认为该点处热流密度为临界热流密度,在此壁面过热度附近,由于热流密度很大,金属壁内

表2 管壁与低温流体间传热模型及判定条件

工况		判定条件		传热模型
		壁面温度	含气率	
膜态沸腾	反环状流膜态沸腾	$T_w > T_L$	$0 \leq \alpha < 0.1$	修正的 Bromley 公式
	弥散流膜态沸腾		$0.1 \leq \alpha < 1$	Dougall-Rohsenow 公式
	过渡沸腾	$T_{\text{CHF}} < T_w < T_L$	$0 \leq \alpha < 1$	线性插值
核态沸腾	过冷沸腾	$T_{\text{ONB}} < T_w < T_{\text{CHF}}$	$\alpha = 0$	修正的 Chen 公式
	饱和沸腾		$0 < \alpha < 1$	Chen 公式
	强制对流换热	$T_w < T_{\text{ONB}}$	$0 \leq \alpha \leq 1$	Dittus-Boelter 关系式

注:欠热或饱和流体膜态沸腾传热的最低壁温采用 Leiden-Frost 温度^[7];欠热或饱和流体泡核沸腾传热的最高壁温采用 Kutateladze 关系式^[9];核态沸腾起始点采用 Hsu 模型^[8]。

壁面温度会迅速降低;此后,随着壁面过热度的减小进入核态沸腾控制区,随壁面过热度的减小热流密度也逐渐减小,并根据含气率等于0或大于0判断是否处于过冷沸腾或饱和沸腾;当壁面过热度继续减小,低于过冷沸腾核化所需的最小过热度 ΔT_{onb} 时,在 172 s 左右时进入单相液体强制对流换热阶段,流动及传热特性趋于稳定。循环回路上其他各点与该特征点具有相类似的温度变化规律,只是相对应的各转折点温度及相应的时间有所区别。

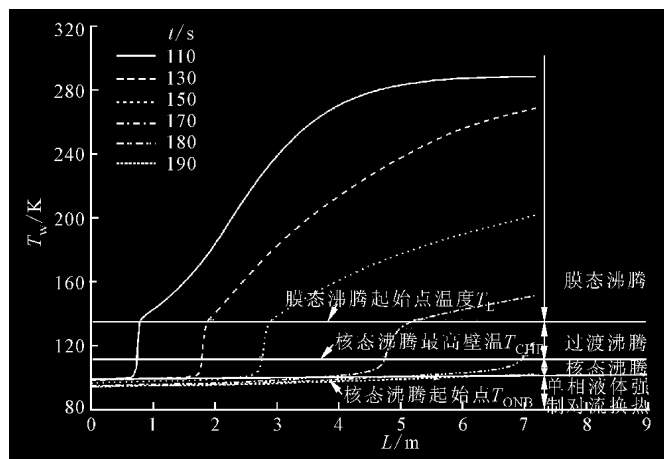


图2 输送管预冷过程中传热工况过渡曲线

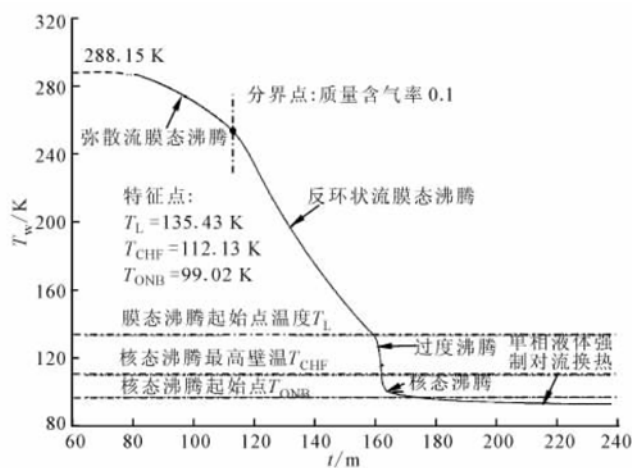


图3 特征点预冷过程中传热工况过渡曲线

3 结束语

针对循环回路预冷过程中最重要的换热形式——膜态沸腾,通过分析其流型和流动传热特征,在膜态沸腾阶段引入了反环状流膜态沸腾和弥散流膜态沸腾,保证了膜态沸腾从全液相向全气相过渡时的传热量变化规律及物理意义上的逻辑自洽性,建立和完善了自然循环预冷回路中低温流体与管路间的传热模型。在此基础上,耦合了循环回路的释

热方程和低温流体间的流动传热方程,并采用二分法迭代求解自然循环回路预冷过程中的非稳态循环流量,建立了液体火箭发动机自然循环回路预冷的一维非稳态均相流数学模型。以输送管为例,研究了自然循环回路预冷过程中传热工况(膜态沸腾、核态沸腾和单相强制对流换热等)的过渡特征及其传热特性,验证了液体火箭发动机自然循环回路预冷模型的有效性。本文所建立的模型可为液体火箭发动机自然循环回路预冷的机理研究提供参考。

参考文献:

- [1] 钟铁魁, 陈国邦. 低温液体火箭发动机循环预冷模拟试验研究 [D]. 杭州: 浙江大学机械与能源工程学院, 2003.
- [2] LAVERTY W F, ROHSENOW W M. Film boiling of saturated nitrogen flowing in a vertical tube [J]. ASME Journal of Heat Transfer, 1967, 89(1): 90-98.
- [3] KAWAJI M, BANERJEE S. Application of a multi-field model to reflooding of a hot vertical tube: model structure and interfacial phenomena [J]. ASME Journal of Heat Transfer, 1987, 109(1): 204-211.
- [4] HEDAYATPOVR A. Transient two-phase flow of cryogenic fluid in a vertical transfer line during the cooldown process [D]. Knoxville, Tennessee, USA: Mechanical Engineering, University of Tennessee, 1990.
- [5] LIAO Jun. Modeling two-phase transport during cryogenic chilldown in a pipeline [D]. Gainesville, Florida, USA: Mechanical Engineering, University of Florida, 2005.
- [6] VELAT C, JACKSON J, KLAUSNER J F, et al. Cryogenic two-phase flow during chilldown [C]// Proceedings of the ASME Heat Transfer/Fluids Engineering Summer Conference. New York, USA: American Society Mechanical Engineers, 2004: 717-722.
- [7] 张育林, 刘昆, 程谋森. 液体火箭发动机动力学理论与应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [8] 鲁钟琪. 两相流与沸腾传热 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
- [9] SABNICK H D, KRULLE G. Numerical simulation of transient in feed systems of cryogenic rocket engines [C]// 31st AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit. San Diego, California, USA: AIAA, 1995: 95-2967.

(编辑 王焕雪)