

文章编号:1000-8055(2009)03-0698-07

液体火箭发动机自然循环预冷回路的数值研究

陈二锋¹, 厉彦忠^{1,2}, 程向华¹

(1. 西安交通大学 能源与动力工程学院, 西安 710049;

2. 西安交通大学 动力工程多相流国家重点实验室, 西安 710049)

摘 要: 针对低温液体火箭发动机预冷自然循环回路的流动与传热过程,建立了一维非稳态均相流数学模型,采用反环状流和弥散流两种流型描述膜态沸腾流型及传热特性.数值计算结果表明:自然循环预冷回路中推进剂流量的不稳定特性是由驱动力——循环回路释热量的不稳定性造成的;预冷过程约 80 %的管路壁面温度下降由膜态沸腾所引起;反环状流和弥散流膜态沸腾流型的引入,可较好解释回流管壁面温度在预冷过程中的逆向分布规律.

关 键 词: 低温液体火箭发动机; 自然循环; 膜态沸腾; 流动与传热

中图分类号: V434.14

文献标识码: A

Numerical studies on natural circulation precooling loop of cryogenic liquid rocket engine

CHEN Er-feng¹, LI Yan-zhong^{1,2}, CHENG Xiang-hua¹

(1. School of Energy and Power Engineering,

Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering,

Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: One set of one-dimensional unsteady homogenous mathematic models for flow and heat process of natural circulation precooling loop of cryogenic liquid rocket engine was established, whilst both inverted annular model and dispersed model were introduced for the prediction of filming boiling region. The results indicate the unstable characteristics of circulation flow rate in precooling process is caused by the unstable characteristics of natural circulation driving force, that is, the heat flux transferred to the cryogenic liquid from the natural circulation precooling loop. Moreover, about 80 % of wall temperature drop takes place in filming boiling region, and the inverted temperature distribution law of the return pipe is well interpreted by introducing the two filming boiling models mentioned above.

Key words: cryogenic liquid rocket engine; natural circulation; filming boiling; flow and heat transfer

自然循环预冷应用于低温液体火箭发动机,是一项新技术.它利用推进剂在两竖直管路中的密度差所引起的驱动力自发流动,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优点.

自然循环过程十分复杂和不稳定.预冷初始

收稿日期:2008-03-06; 修订日期:2008-09-16

基金项目:教育部高等学校博士学科点专项科研基金(20060698021);长江学者和创新团队发展计划(IRT0746)

作者简介:陈二锋(1980-),男,河南漯河人,博士生,主要从事低温两相流动及传热研究. E-mail:cef005@stu.xjtu.edu.cn

阶段,低温推进剂流经常温发动机循环回路时,低温推进剂剧烈气化,引起较大的压力波动,低温推进剂在循环回路中历经全液相、气液两相、全气相三种形式;预冷过程中发动机泵体及回路温度逐渐下降,流出火箭发动机的流体变成气液两相混合物,自然循环回路流动驱动力由回路释热量决定;预冷过程后期相对稳定状态时,发动机泵体及回路温度趋于稳定,低温推进剂仅能通过管路壁面和泵体表面的对流换热吸收热量,维持稳态自然循环回路预冷所需的驱动力.

本文作者通过分析自然循环预冷回路中的流型及流动传热特性,引入了反环状流和弥散流描述膜态沸腾,保证了膜态沸腾物理意义上的逻辑自治性,构建了较完善的低温推进剂与管路间的传热模型,建立了循环预冷回路的一维非稳态均相流数学模型^[1]. 本文在此基础上进行了液体火箭发动机自然循环预冷动态过程的数值模拟,研究了预冷过程中循环流量的变化特征,分析了主要管路的金属壁内表面温度和绝热层外壁面温度的变化趋势及泵流道径向方向的非稳态导热特性.

1 计算模型

1.1 流道与流动模型

低温液体火箭发动机自然循环预冷回路如图 1 所示,由输送管、发动机入口至泵入口管路、泵流道、泵出口至排放阀管路、回流管五段组成. 回路预冷过程中空气侧换热系数难以确定,由于预冷初始阶段空气侧换热量相比金属壁与泵体漏热量小的多,因此可采用稳态时空气侧对流换热系数计算. 空气侧对流换热采用邱吉尔-册斯登准则式,并根据试算法^[2]先假定绝热层外表面温度,分别采用热阻法和邱吉尔-册斯登准则式计算空气侧对流换热系数,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温度. 自然循环预冷回路结构参数及稳态时绝热层外侧换热参数如表 1 所示,管路初始温度 288. 15 K,贮箱内液氧温度 91. 837 K,气枕压力 0. 12 MPa.

管内流动采用一维均相流模型,认为在任一时刻循环回路处于准稳态,不考虑循环回路中的压力波动,认为输送管进口处、回流管出口处的压力为该位置处的静压;忽略管壁的轴向导热及贮箱内液氧温度变化. 根据计算需要在循环回路流动方向取节点间距为 0. 002 m,轴向节点数为 9 666 个,径向网格节点数为 23 个.

输送管进口流速采用二分法迭代求解. 在 t 时刻,首先根据上一个时刻 $(t - \Delta t)$ 计算的输送管进口速度值 v_0 ,确定 t 时刻输送管进口速度迭代初值区间 $[v_0 + \Delta v, v_0 - \Delta v]$,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压力、温度、含气率. 若计算的回流管出口压力为该位置处的静压,则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.

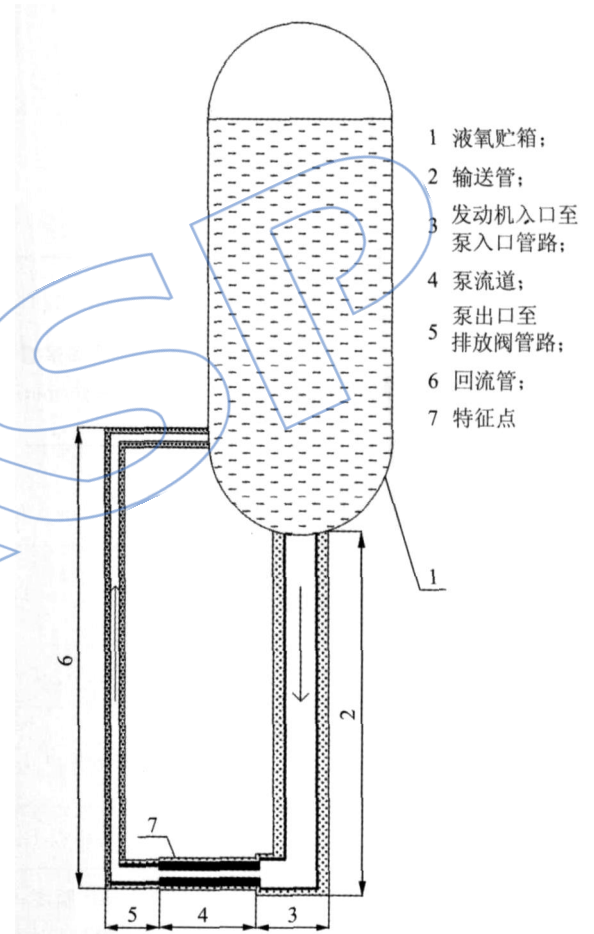


图 1 低温液体火箭发动机自然循环预冷回路简图
Fig.1 Schematic diagram of natural circulation precooling loop of cryogenic liquid rocket engine

1.2 管壁与推进剂间传热模型

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. 膜态沸腾作为预冷过程中最重要的换热阶段,根据其流型及传热特点可分为反环状流膜态沸腾和弥散流膜态沸腾^[6-7]. 当质量含气率较小时低温推进剂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

表 1 自然循环预冷回路的结构及换热参数

Table 1 Structural and heat transfer parameters of natural circulation precooling loop

参 数	输送管	发动机入口至 泵入口管路	泵流道 (折算值)	泵出口至排 放阀管路	回流 管
内径/mm	220	220	54	90	42
壁厚/mm	2.5	3	49	8	1.5
长度/mm	7600	1000	1579	750	8404
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	5A06	GH4169	GH4169	GH4169	5A06
空气侧换热系 数/(W/m ² ·K)	10.90	11.47	13.26	15.16	20.87
绝热层外壁 面温度/K	268	240	247	251	151

表 2 管壁与低温推进剂间传热模型及判定条件^[3-4]

Table 2 Heat transfer models and transformation criterions between cryogenic propellant and pipe^[3-4]

工 况	判定条件		传热模型
	壁面温度	质量含气率	
膜态沸腾	反环状流膜态沸腾	$0 \leq \alpha < 0.1$	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	$T_{CHF} < T < T_F$	$0 \leq \alpha < 1$	线性插值
核态沸腾	过冷沸腾	$\alpha = 0$	修正的 Chen 公式
	饱和沸腾	$0 < \alpha < 1$	Chen 公式
强制对流换热	$T < T_{ONB}$	$0 \leq \alpha \leq 1$	Dittus-Boelter 关系式

膜态沸腾起始点温度 T_F :Leiden Frost 温度;核态沸腾最高壁温 T_{CHF} :Kutateladze 关系式^[5];
核态沸腾起始点温度 T_{ONB} :Hsu 模型

热到液面,产生膜态蒸发,同时管壁与液芯、气膜间存在辐射换热;当质量含气率逐渐变大时,气液两相间增大的流速差会产生更大的相间拖曳力,液芯在相间拖曳力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,壁面与液滴、蒸气间的换热主要是对流换热与辐射换热;当质量含气率逐渐接近于 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

量变化保持物理意义上的逻辑自治性.

2 自然循环预冷回路的流动特性分析

图 2 展示了循环流量随预冷时间的变化规律.从图中可以看出,循环流量在预冷过程中是不稳定的,整体上具有先增大而后减小的变化趋势,并在局部时间段会出现循环流量的峰值点.其峰值点可由循环驱动力——预冷过程循环回路的释热量解释.预冷过程属于一种可控温度的沸腾过程,图 3 为定工况下不同质量含气率时的沸腾曲

线. 从图中可以看出,随预冷过程壁面过热度的减小,循环回路节点经历从膜态沸腾、过渡沸腾、核态沸腾、直至单相强制对流的过渡过程. 图中 B

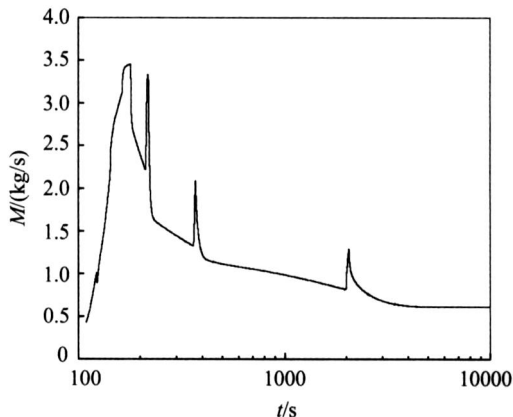


图 2 预冷过程中回路循环流量随预冷时间变化曲线

Fig. 2 Curve of circulation flow rate versus precooling time

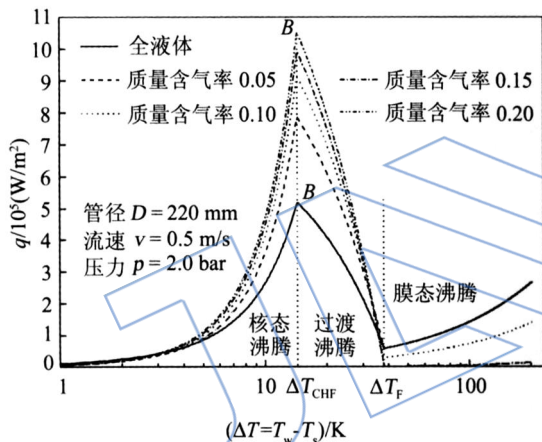


图 3 定工况下不同质量含气率时的沸腾曲线

Fig. 3 Boiling curves at different mass fraction of gas phase

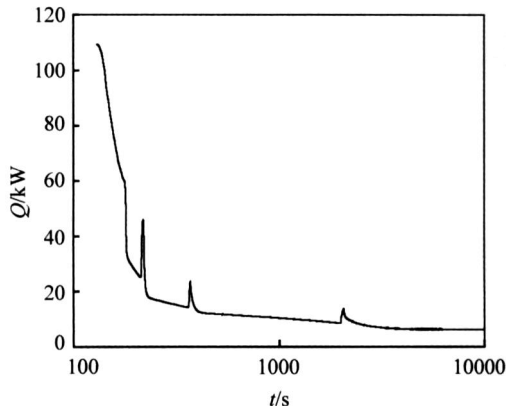


图 4 循环回路释热量峰值点

Fig. 4 Heat leakage peak values of of precooling loop

点为第一临界点^[4],是核态沸腾的最大热流密度点,在此热流密度作用下,壁面温度发生突降,是气膜消失和湿壁形成的临界状态点.相应地,金属内壁面与低温推进剂间热流密度随预冷过程具有先减小后增大,而后再减小的趋势.这种变化趋势的积累效使得管路会在局部时间段出现循环回路释热量的峰值.图 4 展示了预冷过程中循环回路释热量的 3 个峰值点,分别对应发动机入口至泵入口管路、泵出口至排放阀管路、泵流道的过渡过程.循环回路释热量的不稳定性进而引起自然循环预冷过程中循环流量的不稳定特性.

3 自然循环预冷回路的传热特性分析

3.1 特征点传热工况过渡特征分析

取泵流道一点为特征点(取节点 $I = 5\,000$,位置距泵流道入口 $1.4\,\text{m}$),研究预冷过程中传热工况的过渡特征.从图 5 中可以看出:预冷过程特征点依次经历 4 个典型换热阶段:膜态沸腾、过渡沸腾、核态沸腾以及单相液体强制对流换热阶段.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所引起^[4].

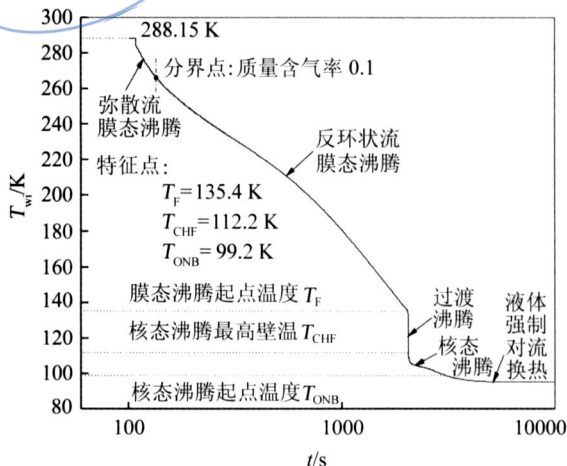


图 5 特征点预冷过程中传热工况过渡曲线

Fig. 5 Transformation curve of heat transfer mechanism

预冷开始阶段,特征点内壁面温度高于膜态沸腾起始点温度 T_F ,且质量含气率大于 0.1 处于弥散流膜态沸腾;随预冷过程质量含气率逐渐减小,约 135s 时质量含气率小于 0.1 而过渡到反环状流膜态沸腾;反环状流膜态沸腾经历时间较长,约 2000s 时内壁面温度低于膜态沸腾起始点温度 T_F 而处于过渡沸腾,随壁面过热度减小热流密度迅速增大,当壁面过热度降低到核态沸腾最高壁

面过热度 ΔT_{CHF} 时,此时热流密度为临界热流密度,内壁面温度发生突降,突降点为气膜消失和湿壁形成的临界状态点;而后随着壁面过热度减小进入核态沸腾控制区,壁面过热度减小热流密度逐渐减小;当壁面过热度继续减小而低于过冷沸腾核化所需的最小过热度 ΔT_{ONB} 时,约 3 000 s 时过渡到单相强制对流换热阶段,流动传热特性趋于稳定.

3.2 特征点的金属壁及绝热层的非稳态导热分析

图 6 展示了预冷过程特征点沿径向的温度分布.金属壁内壁面到金属壁外壁面为节点 1~12,金属壁外壁面到绝热层外壁面为节点 12~23.从图中可以看出:预冷过程中金属壁及绝热层从内至外各节点温度变化趋势逐渐变缓,并逐步趋于稳定.稳定时特征点处泵流道内壁面温度为 95.4 K,绝热层外壁面温度为 247.0 K,与稳态计算绝热层外壁面温度相一致.由于金属壁热阻相对绝热层热阻较小,因此金属壁厚方向上温度梯度较小,而绝热层厚度方向上温度梯度较大.

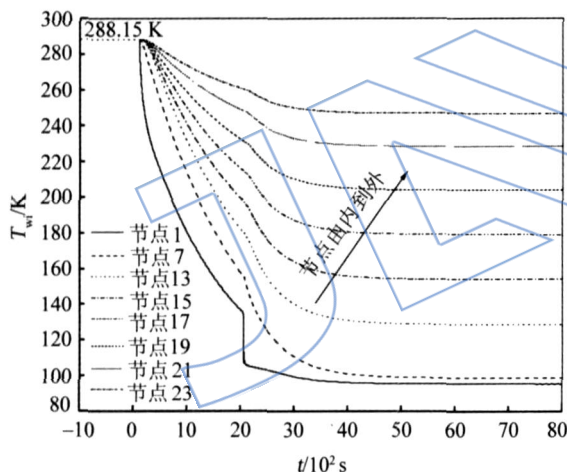


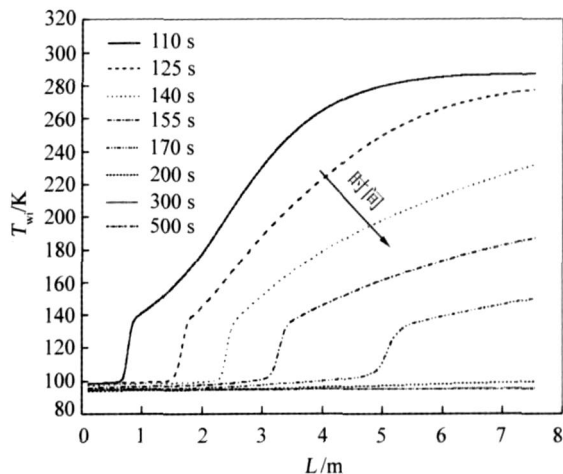
图 6 特征点的非稳态导热过程

Fig. 6 Unsteady heat conduction process

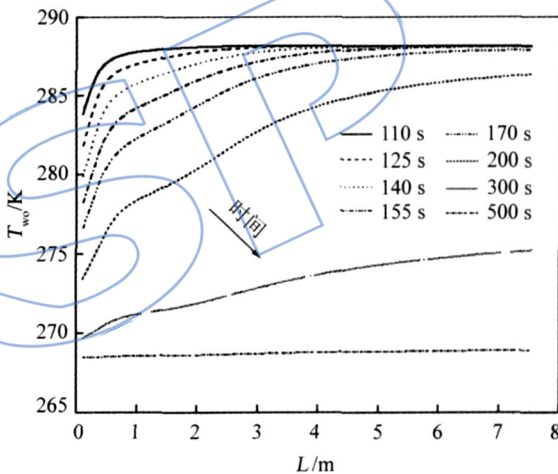
3.3 输送管、泵流道及回流管的壁面温度变化

图 7(a)和(b)为输送管金属壁内壁面温度和绝热层外壁面温度随时间的变化曲线.从图中可以看出,随预冷过程金属壁内壁面温度及绝热层外壁面温度均在降低,且由于外侧绝热层热阻较大,从低温推进剂传递来的冷量较难传递给外侧绝热层,因此外侧绝热层相比金属壁需要相对长的时间才能达到稳定.预冷初始阶段金属壁内壁面温度会存在一个明显的突降点,突降点发生在临界热流密度点位置,是气膜消失和湿壁形成的

临界状态点.突降点随预冷时间逐渐后移,约 200 s 时金属壁内壁面温度趋于基本稳定.



(a) 金属壁内壁面温度



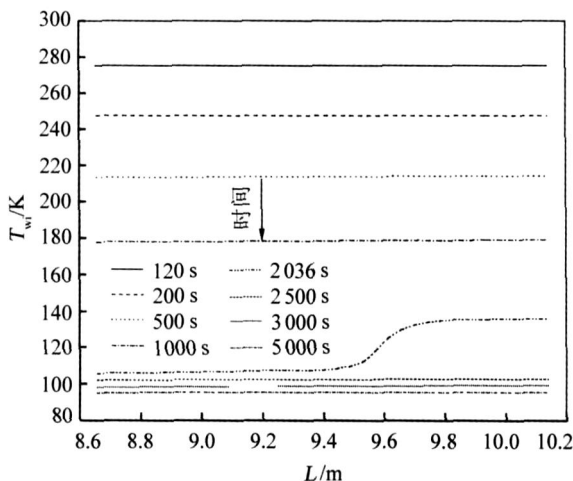
(b) 绝热层外壁面温度

图 7 输送管内、外壁面温度随时间变化曲线

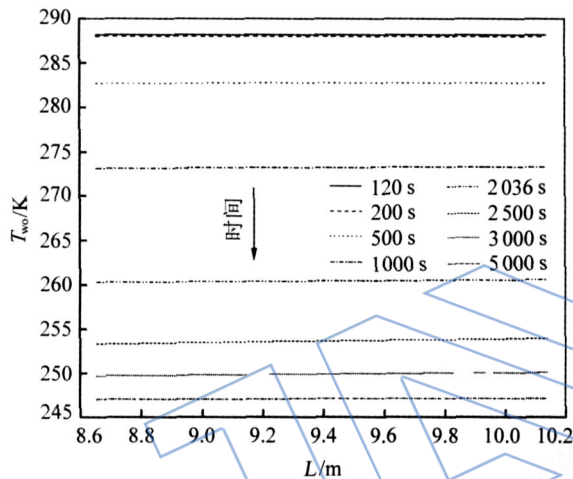
Fig. 7 Predicted wall temperature distribution of supply pipe versus precooling time

图 8(a)和(b)展示了泵流道金属壁内壁面温度及绝热层外壁面温度随时间的变化曲线.泵流道是发动机及泵体的简化模型,它是一个具有厚金属壁的圆形通道.由于泵流道相对较短,预冷过程金属壁内壁面温度及绝热层外壁面温度温度梯度并不明显,仅当泵流道节点传热工况发生在临界热流密度点附近时,沿流动方向金属壁内壁面温度才会存在较大的温度梯度.约 2 500 s 时泵流道内壁面温度降至 102 K,可认为金属壁内壁面温度趋于基本稳定.

图 9(a)和(b)为回流管金属壁内壁面温度和霜层外壁面温度随时间的变化曲线.预冷初始阶段回流管内基本为全气相,金属内壁面与低温推进剂间换热形式主要为单相强制对流换热,沿流



(a) 金属壁内壁面温度

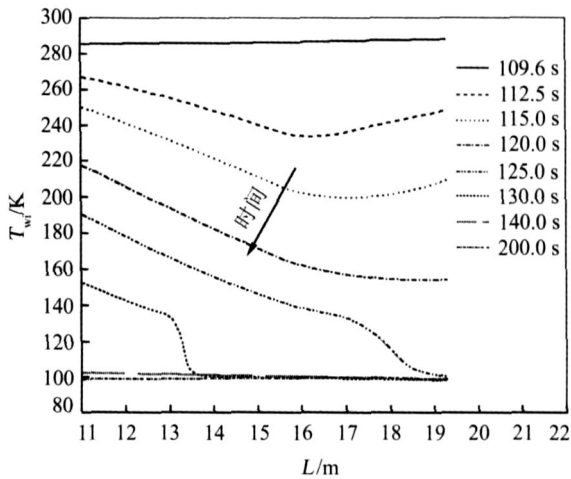


(b) 绝热层外壁面温度

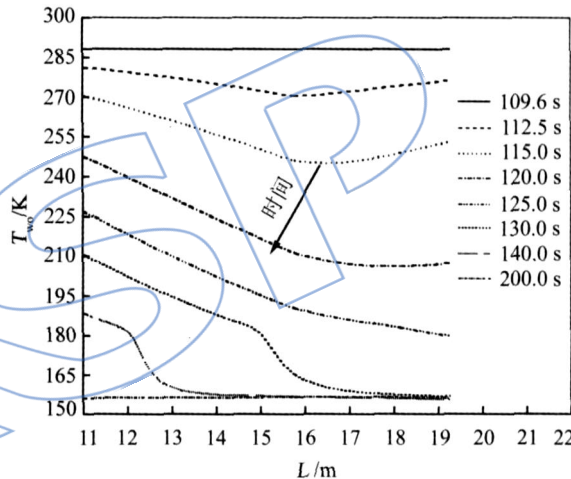
图 8 泵流道内、外壁面温度随时间变化曲线

Fig.8 Predicted wall temperature distribution of pump pipe versus precooling time

动方向金属壁内壁面温度和霜层外壁面温度逐渐增大;随后回流管主要处于具有较大质量含气率的弥散流膜态沸腾阶段,沿流动方向金属内壁面与低温推进剂间的热流密度随质量含气率的增加先增大而后减小,并当质量含气率接近 1 时弥散流膜态沸腾接近全气相对流换热,使得金属壁内壁面温度和霜层外壁面温度则先减小后增加;而后随着回流管出口截面质量含气率逐渐减小,沿流动方向金属内壁面与低温推进剂间的热流密度将逐渐增大而不会减小,相应的金属壁内壁面温度和霜层外壁面温度沿管线逐渐减小,即出现回流管顶部温度低而底部温度高的逆向分布规律,从理论上解释了循环回路预冷实验中回流管顶部结霜而底部未结霜的现象.当回流管金属壁内壁面温度继续降低到临界热流密度点附近时,金属



(a) 金属壁内壁面温度



(b) 霜层外壁面温度

图 9 回流管内、外壁面温度随时间变化曲线

Fig.9 Predicted wall temperature distribution of return pipe versus precooling time

内壁面温度和霜层外壁面温度发生突降.与输送管相比,由于回流管沿流动方向金属壁内壁面温度是逐渐降低的,突降点位置随预冷时间逐渐前移.

4 结 论

本文采用反环状流和弥散流描述膜态沸腾的较完善的传热模型和一维非稳态均相流模型,较好地模拟了低温液体火箭发动机自然循环预冷过程中的流动与传热特性,得到了以下结论:

- 1) 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所引起.反环状流和弥散流膜态沸腾的引入完善了预冷过程中管路与低温流体间的传热模型,从理论上解释了预冷初始阶段沿流动方向回

流管路管壁温度由高到低分布的逆向分布特征。

2) 自然循环预冷回路中推进剂循环流量的不稳定特性是由驱动力——循环回路释热量的不稳定性所造成,计算结果再现了发动机入口至泵入口管路、泵出口至排放阀管路、泵流道从膜态沸腾到单相强制对流换热过渡过程中循环流量(循环回路释热量)峰值的现象。

参考文献:

- [1] 陈二锋, 厉彦忠, 程向华, 等. 液体火箭发动机自然循环回路预冷非稳态数学模型[J]. 西安交通大学学报, 2008, 42(9): 1127-1131.
- CHEN Erfeng, LI Yanzhong, CHENG Xianghua, et al. Unsteady mathematic models of natural circulation loop precooling of liquid rocket engine [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2008, 42(9): 1127-1131. (in Chinese)
- [2] 钟轶魁, 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, 2003.

ZHONG Yikui, CHEN Guobang. Experimental study on natural precooling cycle of cryogenic liquid rocket [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2003. (in Chinese)

- [3] 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.
- [4] 鲁钟琪. 两相流与沸腾传热[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
- [5] Sabbick H D, Krulle G. Numerical simulation of transient in feed systems of cryogenic rocket engines [R]. AIAA 95-2967, 31st AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, 1995.
- [6] Hedayatour A. Transient two-phase flow of cryogenic fluid in a vertical transfer line during the cooldown process [D]. Knoxville, USA: University of Tennessee, 1990.
- [7] LIAO Jun. Modeling two-phase transport during cryogenic chilldown in a pipeline [D]. Florida, USA: University of Florida, 2005.