

火箭发动机液氢预冷回路非稳态传热特性研究

王磊, 厉彦忠, 李翠, 陈二锋, 程向华

(西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 针对液氢预冷火箭发动机自然循环回路的流动与传热过程, 建立了一维非稳态均相模型来研究预冷过程中管路的温降特性. 在膜态沸腾阶段引入过渡膜态沸腾, 保证了弥散流膜态沸腾向反环状流膜态沸腾的合理过渡. 一般流体的膜态沸腾起始壁温 T_L 大于核态沸腾最高壁温 T_{CHF} , 而氢的 T_L 小于 T_{CHF} , 使得氢的沸腾曲线不同于其他流体, 造成计算时传热与流型转换的不连续, 因此考虑以 T_{CHF} 作为膜态沸腾起始壁温, 以 T_L 作为核态沸腾最高壁温, 通过增加过渡沸腾区来确保计算顺利进行. 计算发现: 预冷过程中, 回路管壁温沿流动方向表现出从高到低的逆向分布规律, 最高壁温点位于反环状流向弥散流过渡区间处, 最高壁温点位置随时间逐渐向下游推进.

关键词: 自然循环; 膜态沸腾; 液体火箭; 预冷

中图分类号: V434.14 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2010)05-0120-05

Study on Unsteady Heat Transfer Characteristic of Liquid Hydrogen Precooling Loop of Rocket Engine

WANG Lei, LI Yanzhong, LI Cui, CHEN Erfeng, CHENG Xianghua

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

Abstract: A set of one-dimensional unsteady homogenous models for flow and heat transfer process of a natural circulation precooling loop of a rocket engine is established to study the cool-down characteristic of the pipeline when liquid hydrogen flows in the pipeline. A transition film-boiling model is adopted to ensure the reasonable transition from dispersed film-boiling to inverted film-boiling. T_{CHF} and T_L are viewed as the onset temperature of film-boiling and the temperature of critical heat flux, respectively, to achieve the continuity of heat transfer and flow regime transition in the calculation. The computing results show that the inverse temperature distribution exists at the loop along the flow direction during the precooling process. The maximum wall temperature is located at the transition from inverted flow to dispersed flow. In addition, the location of the maximum wall temperature moves downstream with time gradually.

Keywords: natural circulation; film-boiling; liquid rocket; precooling

新一代大推力液体火箭以液氢、液氧等低温流体为推进剂, 在发射前需要对发动机及相应管路进行快速、可控、有效的预冷. 自然循环回路预冷是利用推进剂在两垂直管内的密度差驱动流体流动以实现预冷效果的新型预冷方式, 具有节省推进剂消耗量、简化火箭射前程序、增加预冷安全系数和实现延迟点火等优点^[1-2].

国内外有关液体火箭发动机自然循环回路预冷的研究文献相对较少, 浙江大学陈国邦教授等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, 证明无论是气相回流还是液相回流, 自然循环均能建立, 并分析了回流管直径、绝热方式及气枕增压等对预冷回路的影响情况, 但对于管内的流型转化及换热方式未做详尽说明^[3]. 陈二

锋等人针对自然循环预冷回路的流动和传热特点,建立了一维非稳态均相数学模型,采用反环状流和弥散流两种流型来描述膜态沸腾的传热特性,预示了液氢推进剂流经管路时壁温的变化趋势,揭示了回流管壁温在预冷过程中表现出逆向分布的特征^[1-2]. 关于强制流动预冷管路,国内外学者开展了大量有意义的工作. Liao 认为预冷过程中低温流体先后经历膜态沸腾、核态沸腾和单相对流换热,流型在水平管中以分层流为主,而在垂直管中以均匀流为主,应分别以双流体模型与均相模型求解^[4]. Hedayatpour 在此基础上着重探讨了膜态沸腾的换热机理,采用双流体模型预示了液氮流经垂直上升管时的流动与传热特性,并与实验结果对比证明了文中所采用膜态换热模型的正确性^[5]. Yuan 等人采用实验方法研究了不同重力下液氮流经水平管的换热特性,在地面重力条件下管内流型处于分层流,液相能够较好地润湿管壁,使壁温在短时间内降至稳态值,而在微重力条件下,液相处于管路中心,壁面得不到润湿,管壁冷却下来需更长时间^[6].

综上所述,对于低温流体预冷管路的研究,学者们主要从流型判定及确定相应换热规律两方面进行分析,取得了很多有意义的成果,而对以液氢为冷却剂预冷循环回路的研究尚未见文献报道. 与液氮、液氧相比,液氢物性特殊,具有更低的饱和温度,更小的密度、黏性,且根据公式计算得到的氢的膜态沸腾起始壁温低于核态沸腾最高壁温,这些性质均会对液氢预冷管路时的流型及换热机理造成影响. 本文针对液体火箭液氢贮箱的简化预冷管路结构,建立一维非稳态均相模型,数值模拟了自然循环预冷的动态过程,揭示了液氢预冷回路时壁温的变化规律. 同时,文献[1-2]在膜态沸腾计算中引入反环状流膜态沸腾与弥散流膜态沸腾,保证了物理意义上的逻辑自洽性,本文在此基础上引入过渡膜态沸腾,保证了弥散流膜态沸腾向反环状流膜态沸腾的合理过渡.

1 计算模型

1.1 物理模型

图1为液氢贮箱自然循环预冷回路示意图. 本文研究的目的在于分析液氢流过管路时的温降特性,因此为简化计算,不考虑输液泵对预冷回路的影响. 简化后的回路由输送管、水平管、回流管3段管路组成. 管路内径取180 mm,壁厚为1 mm,管外包裹有10 mm厚的发泡材料,管长分别为2 000、

2 000、2 460 mm. 假设初始时刻壁温为288.15 K,气枕压力取0.12 MPa,并据此计算预冷回路进出口处压力,贮箱内液氢温度取气枕压力所对应的饱和温度20.863 K. 由于液氢密度较小,贮箱底部压力相对于气枕压力变化不大,造成预冷管路口处液氢过冷度很小,只有0.38 K,因此液氢管路需要特别注意绝热问题.

液氢自贮箱底部进入循环回路,经管路升温后从回流口流回贮箱底部,其间管壁蓄热及外界热驱动流体在回路内流动. 整个预冷过程非常复杂:回路存在垂直下降流、水平流、垂直上升流等;管内流体涵盖了反环状流、弹状流、弥散流、单相流动等多种流型;根据壁温及含气率的不同,管内换热主要包括了单相强制对流、膜态沸腾、过渡沸腾、核态沸腾等形式. 这些因素在计算中需着重考虑.

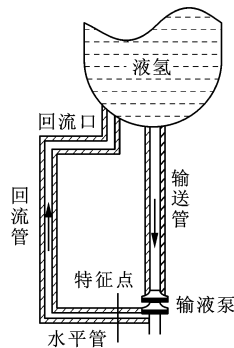


图1 液氢贮箱自然循环预冷回路示意图

1.2 换热及流动模型

低温流体预冷管路可看作为控制壁温 T_w 的沸腾过程. 由于缺少氢沸腾曲线的实验数据,只能根据经验公式来确定各临界点温度. 表1列出了0.12 MPa时几种常见工质的核态沸腾最高壁温 T_{CHF} 与膜态沸腾起始壁温 T_L ,可以看出,一般流体的 T_{CHF} 小于 T_L ,而氢的 T_{CHF} 大于 T_L ,使得氢的传热在膜态沸腾与核态沸腾之间基本上是直接转换的,没有过渡沸腾阶段,造成了二者在沸腾曲线上的不同,如图2所示. 对于其他流体,随着壁温的降低,管内先后经历了膜态沸腾、过渡沸腾、核态沸腾等换热形式,过程沿图2a中A-B-C-D的顺序进行. 氢的沸腾曲线如图2b所示,B点为膜态沸腾起始点,C点为核态沸腾最高点. 若不做任何处理,当壁温降至 T_L 与 T_{CHF} 之间时,同一壁温对应两个热流密度 q ,使得计算振荡而不能继续. 针对氢的这种特殊性,文献[7]建议在计算以氢为冷却剂的传热时仅以 T_L 作为核态沸腾与膜态沸腾的分界点,然而这样处理会造成

热流密度在分界点两侧出现大的跳跃,造成壁温的突降,不符合物理过程.为更好地解决液氢预冷管路时的换热模型转化问题,本文考虑将计算所得的 T_{CHF} 作为膜态沸腾起始壁温,如图 2b 中 B' 所示,同时将计算所得的 T_L 作为核态沸腾最高壁温,如图 2b 中 C' 所示.处理后的氢沸腾曲线为图 2b 中的 $A-B'-C'-D$,并将 $B'C'$ 之间区域看作过渡沸腾区,采用线性插值来确定此处的热流密度.实际中,氢的沸腾曲线包括过渡沸腾区,涉及的温区约为 5 K,本文处理后的过渡沸腾温区约为 4.6 K,相对于文献[7]更加接近于实际情况,且处理后的换热模型转化问题得到了较好解决.

表 1 常见工质的核态沸腾最高壁温与膜态沸腾起始壁温

工质	O ₂	N ₂	H ₂ O	H ₂
T_{CHF}/K	111.1	96.0	418.9	33.7
T_L/K	135.1	110.4	563.6	29.1

表 2 列出了液氢预冷管路时不同工况下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机理,其描述的准确性直接影响到整个预冷过程的正确性.文献[1-2]以质量含气率 0.1 为界将膜态沸腾划分为反环状流膜态沸腾与弥散流膜态沸腾,而实际的反环状流与弥散流之间并没有严格的分界点.一般认为,当管内截面含气率 β 小于 0.5 时,流型为反环状流,而当截面含气率大于 0.8 时,流型为弥散流^[8],可以分别采用 Bromley 公式与修正 Dittus-Boelter 公式来计算两种流型所对应的换热工况.对于截面含气率处于 0.5~0.8 之间的膜态沸腾(称其为“过渡膜态沸腾”),尚缺乏相关传热模型来描述其换热机理,本文考虑在反环状流膜态沸腾与弥散流膜态沸腾之间采用线性插值来确定其热

流密度的大小.通过上述处理,膜态沸腾换热模型更趋完善,过渡膜态沸腾的引入保证了弥散流膜态沸腾向反环状流膜态沸腾的合理过渡.

当采用 Dittus-Boelter 公式计算氢为冷却剂的单相对流换热时,传热系数取 0.021.液氢的黏性系数小,其流动阻力较一般液体要小很多,根据已有的实验数据,单相液氢流经管路时的沿程摩擦阻力系数可用下式计算^[7]

$$f = 0.147Re^{-0.179}$$

对于两相流,本文采用 Chisholm 公式^[9]计算其沿程阻力系数.

2 计算结果分析

2.1 特征点温降特性分析

取水平管 0.5 m(自右向左,如图 1 所示)处为特征点来研究管壁在预冷过程中的温降特性及对应

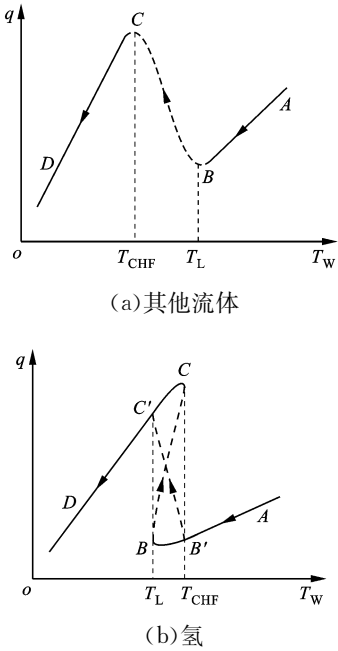


图 2 沸腾曲线示意图比较

表 2 管壁与液氢间的传热模型及判定条件

工况	判定条件		传热模型
	T_w	β	
气相对流	$T_{CHF} < T_w$	$\beta = 1$	Dittus-Boelter 公式
弥散流膜态沸腾		$0.8 < \beta < 1$	修正 Dittus-Boelter 公式
过渡膜态沸腾		$0.5 < \beta \leq 0.8$	线性插值
反环状流膜态沸腾		$0 < \beta \leq 0.5$	Bromley 公式
过渡沸腾	$T_L < T_w \leq T_{CHF}$	$0 < \beta < 1$	线性插值
核态沸腾	$T_{ONB} < T_w \leq T_L$	$0 < \beta < 1$	Chen 公式
过冷沸腾	$T_{ONB} < T_w \leq T_L$	$\beta = 0$	修正 Chen 公式
液相对流	$T_w \leq T_{ONB}$	$\beta = 0$	Dittus-Boelter 公式

注： T_{ONB} 表示过冷沸腾起始壁温.

的传热工况。图 3 显示了特征点壁温 T_w 随时间 t 的变化,可以看出低温流体在特征点处先后经历了单相气体对流、弥散流膜态沸腾、过渡膜态沸腾、反环状流膜态沸腾、过渡沸腾、核态沸腾等,其绝大部分温降发生在膜态沸腾区,占总温降的比例超过了 90%,这一比例高于其他常见的低温流体^[2],并且越靠近预冷回路入口,膜态沸腾所占比例越高,由此可见膜态沸腾在预冷过程中扮演着重要角色。预冷开始时,低温流体进入管路并逐渐向下游推进,未到达特征点时,壁温保持室温恒定;随着时间的推移,输送管中气化生成的气氢首先到达特征点,壁温在气相对流作用下开始降低,由于气相对流换热系数较小,温降速度减慢;随后夹杂液滴的气氢到达特征点,换热形式逐渐从气相对流过渡至弥散流膜态沸腾,热流密度增大,温降速度加快;随着预冷的进一步进行,流经特征点的两相流含气率逐渐降低,液滴逐渐增多增大并开始混合,由于壁温仍较高,流型逐渐从弥散流过渡至反环状流,换热方式相应转变为反环状流膜态沸腾;当特征点壁温低于 T_{CHF} 时,换热方式随即进入过渡沸腾区,热流密度继续增大,管壁温降速度进一步加快;当壁温低于 T_L 时,换热进入核态沸腾区,热流密度达到最大并开始降低,壁温在很短时间内降至稳态值。

2.2 回路管壁温变化趋势

图 4 展示了预冷回路管壁温 T_w 随时间 t 的变化趋势, x 表示距预冷回路入口的长度。可以看出,各点壁温均随时间的推移逐渐降低,但温降速度及所经历的流型特征并不相同。预冷进行到一定程度时,沿流动方向壁温会表现出先增大后降低的逆向分布规律。分析原因如下:随着预冷过程的进行,管内流体主要处于两相流区,沿流动方向含气率逐渐增大,流型为反环状流与弥散流。对于反环状流膜态沸腾换热,低温液氢与管壁之间被气膜隔开,热量通

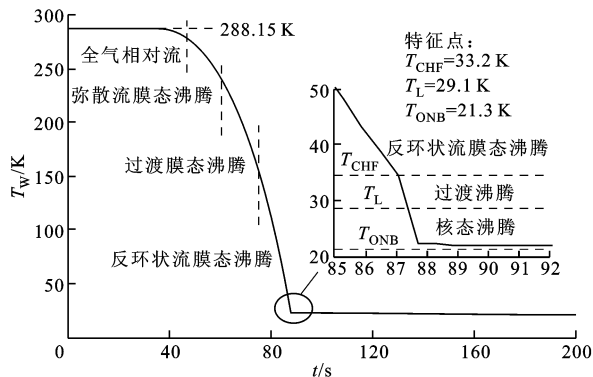


图 3 特征点温降曲线

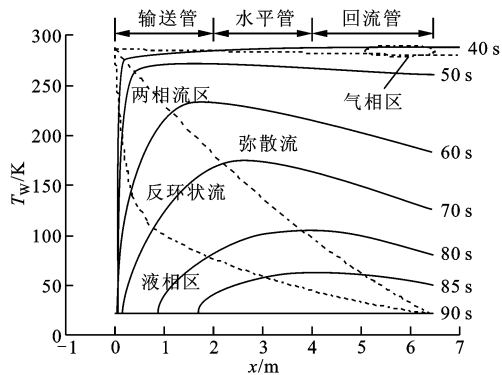


图 4 预冷回路管壁温随时间变化的趋势

过气体导热才能传给液氢,而气体导热的换热系数较小,使得反环状流膜态沸腾换热系数小于弥散流膜态沸腾,进而造成回路下游管路较之上游温降速度更快,且最高温度点位于反环状流向弥散流的过渡区间处。随着预冷过程的进行,管内含气率持续降低,反环状流与弥散流的过渡区间逐渐向下游推进,造成最高温度点相应向下游移动。

3 结 论

本文针对氢的特殊性,采用一维均相模型对以液氢为冷却剂的自然循环回路预冷过程进行了数值模拟,得到如下结论。

(1)一般流体的膜态沸腾起始壁温 T_L 大于核态沸腾最高壁温 T_{CHF} ,而氢的 T_L 小于 T_{CHF} ,造成氢的沸腾曲线不同于其他流体。本文在数值计算中将 T_L 作为核态沸腾最高壁温,同时将 T_{CHF} 作为膜态沸腾起始壁温,通过增加过渡沸腾区来确保计算顺利进行。

(2)为了更加精确地描述膜态沸腾换热过程,保证热流密度的合理过渡,本文在反环状流膜态沸腾与弥散流膜态沸腾之间引入过渡膜态沸腾,从而更加完善了管壁与低温流体间的传热模型。

(3)预冷过程中,回路管壁温沿流动方向表现出从高到低的逆向分布特征,最高温度点存在于反环状流膜态沸腾向弥散流膜态沸腾的过渡区间处,且最高温度点随时间的推移逐渐向下游推进。

参考文献:

- [1] 陈二锋,厉彦忠,程向华. 液体火箭发动机自然循环预冷回路的数值研究[J]. 航空动力学报,2009,24(3): 698-704.
CHEN Erfeng, LI Yanzhong, CHENG Xianghua. Numerical studies on natural circulation precooling

- loop of cryogenic liquid rocket engine[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2009, 24(3): 698-704.
- [2] 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值研究[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.
- [3] 陈国邦, 郑锡亮, 钟秩魁, 等. 低温液体火箭发动机模拟预冷过程的传热与压降[J]. *低温工程*, 2002(3): 1-10.
- CHEN Guobang, ZHENG Xiliang, ZHONG Zhikui, et al. Heat transfer and pressure drop during the modeling precooling test of a cryogenic liquid rocket engine [J]. *Cryogenics*, 2002(3): 1-10.
- [4] LIAO Jun. Modeling two-phase transport during cryogenic chilldown in a pipeline[D]. Gainesville, Florida, USA: University of Florida. Mechanical Engineering, 2005.
- [5] HEDAYATPOVR A. Transient two-phase flow of cryogenic fluid in a vertical transfer line during the cool-down process[D]. Knoxville, Tennessee, USA: University of Tennessee. Mechanical Engineering, 1990.
- [6] YUAN Kun, JI Yan, CHUNG J N. Numerical modeling of cryogenic chilldown process in terrestrial gravity and microgravity[J]. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2009, 30(1): 44-53.
- [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] HAMMOUDA N, GROENEVELD D C, CHENG S C. Two-fluid modeling of inverted annular film boiling [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1997, 40(11): 2655-2670.
- [9] 鲁钟琪. 两相流与沸腾传热[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.

(编辑 荆树蓉)