

文章编号: 1000-8055(2009)01-0224-06

回流口位置对液体火箭液氧贮箱热分层的影响

程向华¹, 厉彦忠¹, 陈二锋¹, 张化照²

(1. 西安交通大学 能源与动力工程学院, 西安 710049;

2. 北京宇航系统工程研究所, 北京 100076)

摘 要: 低温液体火箭射前需要采用自然循环方式对火箭发动机进行充分预冷, 循环预冷管路的回流口位置是影响液氧贮箱内部场分布的重要因素。采用计算流体力学(CFD)技术, 通过对不同回流位置的液氧贮箱物理场的数值模拟, 揭示了贮箱内部温度场及速度场的分布特性, 分析了回流口位置对贮箱内部热分层的影响规律。研究表明, 当回流口位于下封头以上 2 m 位置时, 贮箱内部液氧过冷度最大, 过冷液体含量最多, 回流位置最佳。此研究结果为运载火箭推进系统的设计提供了重要的理论支持。

关 键 词: 循环预冷; 推进剂; 液氧贮箱; 热分层

中图分类号: V421.33

文献标识码: A

Effect of the return flow locations on the thermal stratification in liquid oxygen tank of rocket

CHENG Xiang-hua¹, LI Yan-zhong¹, CHEN Er-feng¹, ZHANG Hua-zhao²

(1. School of Energy and Power Engineering,

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

2. Beijing Institute of Astronautical Systems Engineering, Beijing 100076, China)

Abstract: The engine of cryogenic liquid rocket is required for fully precooling by natural circulation before launching, and the return flow location of the circulation loop plays an important part in field distribution of tank. In the present investigation, the physical field of tank with different return flow locations was simulated numerically based on computational fluid dynamics (CFD) technique, the distributions of temperature and velocity fields were depicted, the effect of the return flow location on thermal stratification was analyzed. It is found that the return location at 2 meter above the bottom header is optimal, where the volume and depth of subcooled liquid oxygen in tank have the most values, thus providing an important theoretical support to the design of rocket propulsion system.

Key words: circulation precooling; propulsion; liquid oxygen tank; thermal stratification

液体火箭以液氢、液氧等低温液体作为推进剂, 具有无毒、无污染、低成本、大推力、高可靠性的特点, 在设计上采用自然循环方式进行火箭发动机及管路预冷。循环预冷刚开始时, 由于发动机及管路系统处于室温, 与低温工质的温差很大, 低

温工质从液氧贮箱进入输送下降管后急剧汽化, 密度减小, 管路内出现气相或气、液两相混合流动, 自然循环预冷正是利用输送管与回流管内流体密度差作为驱动力进行发动机预冷^[1]。液氧贮箱作为液体火箭的燃料储存和供给设备, 由于地

收稿日期: 2007-12-24; 修订日期: 2008-02-22

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

作者简介: 程向华(1978-), 男, 陕西凤翔人, 博士生, 主要从事低温流体传热及流动研究。联系人: 厉彦忠, 教授。

面停放阶段的外部自然对流及飞行过程中气动热等原因,导致内部近壁面区域的流体温度升高,密度减小,形成自然对流的热边界层.在浮升力的作用下热流体沿壁面向上运动,从而在液氧贮箱内部形成热分层现象.热分层现象不但直接影响液氧的蒸发和贮箱内部压力升高,而且可能会引起输送泵体的气蚀问题,严重时致使液氧无法进入发动机,造成发动机过早熄灭,致使发射失败.同时,循环预冷回流流体作为液氧贮箱的输入扰动源从回流口进入贮箱,又将直接影响内部场的初始状态和热分层的分布趋势.因此,热分层现象是液体火箭液氧贮箱设计中需要重点考虑的问题.

目前涉及低温液体火箭推进剂贮箱热分层问题的相关研究已有文献报道.章潭云^[2]等采用涡流函数法对低温流体-液氢热分层进行了数值模拟,同时拟合出表面温度对热流密度、液体填充率及时间的函数表达式. Das S P^[3]等对方型透明容器内水采用壁面加热的可视化试验方法,进行了水的热分层现象实验研究,并且采用数值模拟的方法对圆柱型筒体内液氢的热分层规律进行了分析,两种结果对比得到了相似的结论. Tartom^[4]等利用边界层积分方法对火箭液氢推进剂的热分层进行了分析,并选用水作为研究工质进行了模拟实验.根据现有文献资料^[2-7],关于低温推进剂热分层问题的相关研究大多都集中于无输入输出的封闭贮箱,对带有循环预冷回路的贮箱内部温度场及速度场分布的研究较少,针对回流管出口位置对贮箱内部热分层影响规律的研究未见报道.液氧贮箱结构庞大,并且液氧自身的物性特殊,进行可视化等实验研究非常困难.因此,本文采用 CFD 技术,通过对带有循环预冷回路的液氧贮箱物理场的数值模拟,揭示贮箱内部温度场和速度场的分布特性,研究回流管出口位置对液氧热分层的影响规律,从而得出回流管的最佳出口位置.

1 理论分析与模型建立

1.1 回流口位置分析

根据自然循环原理计算可知,随着回流管出口位置的提高,循环驱动力逐渐增大,当回流位置升到一定高度时,循环驱动力最终趋于恒定,图 1 为不同回流高度时回流管出口截面流体质量流量和截面含气率变化曲线.由图 1 可知,对于发动机预冷来说,随着回流管出口位置升高,回流管出口流体截面含气率越大,循环驱动力越大,流体质量

流率越大,预冷效果越好.相反对于液氧贮箱来说,提高回流管出口位置,预冷回路吸收热量增加,回流管出口截面的流体速度、截面含气率增加,导致流场扰动增强,液体温度快速升高,热分层分布趋势改变,过冷度减小,液氧品质降低.因此,回流管出口位置是影响发动机预冷和贮箱内部场分布的重要因素,研究不同回流位置对贮箱内部温度场及热分层的影响规律,优化回流位置是液体火箭推进系统设计中的重要问题.

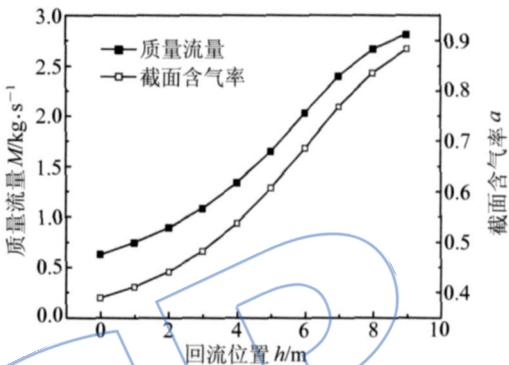


图 1 不同回流高度回流管出口流体质量流量及截面含气率变化曲线

Fig. 1 Mass flux and void fraction of return flow pipe outlet with different return flow locations

1.2 模型建立

图 2 为不同回流口位置的循环预冷系统图,液氧贮箱主体由圆柱筒体及上下两椭圆型封头组成,贮箱侧壁和底部封头用 0.02 m 厚的保温材料

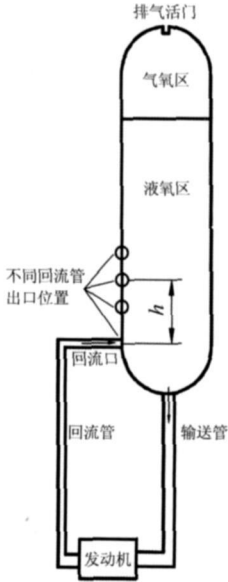


图 2 不同回流位置的循环预冷系统

Fig. 2 Circulation precooling system with different return flow locations

包裹,上端封头视为绝热边界.为了研究不同高度回流位置对液氧贮箱内部场的影响,定义圆柱型筒体和封头相接处为 $h=0\text{ m}$,分别选取 $h=0,1,2\text{ m}$ 和 3 m 四种回流口位置进行研究分析.根据贮箱结构特点,网格采用整体粗化和局部细化相结合.液体火箭的地面预发射阶段属于复杂的非稳态过程,考虑到计算的效率及精度,本文采用二维的简化模型,通过相似原理将三维边界条件转化为二维计算边界,表1为循环预冷回路稳态状态时刻不同回流高度时回流管出口和输送管入口截面参数.气枕压力假定恒为 0.12 MPa ,输送管入口流体温度取 91.837 K .由于液氧贮箱内部存在气液自由相界面,因此本文在采用Fluent软件计算时选用VOF模型来解决自由表面流问题.为了准确地对液氧箱内部场进行数值模拟,针对贮箱中存在低温相变的实际问题(既有沸腾相变,又有冷凝相变),本文编写了相变模型的自定义程序,从而较好的解决了贮箱中液氧与气氧之间的相变问题.

表 1 不同回流高度贮箱回流管出口和输送管入口截面参数

Table 1 Outlet parameters of return flow pipe with different return flow locations				
回流管出口位置 h/m	0	1	2	3
回流管截面含气率 $\alpha/\%$	38.9	41.2	44.1	48.2
回流管出口流速 $v/(\text{m/s})$	0.651	0.801	1.006	1.311
回流口流体温度 T/K	97.69	97.05	96.45	95.76
输送管入口速度 $v/(\text{m/s})$	0.014 6	0.017 3	0.020 8	0.025 2

2. 计算结果分析

液体火箭在地面停放阶段,液体贮箱内部要重复进行多次复杂的操作过程,如地面增压、补液和排气、自然循环预冷和过冷加注等,从而使得贮箱内部压力场、速度场、温度场以及气液界面发生复杂的变化.从发动机地面预冷开始至箭体升空整个阶段,液氧贮箱的绝大部分操作过程均处于自然循环预冷状态,因此本文针对氦气引射结束

后的自然循环预冷过程进行液氧贮箱内部场的分布特性及热分层规律研究.图3为不同回流口位置的液氧贮箱自然循环进行到 120 min 时刻贮箱内部速度矢量图.回流流体进入贮箱后随边界层内热流体在浮升力的作用下沿壁面向上运动,由于运动方向与浮升力方向相同,速度逐渐增大,运

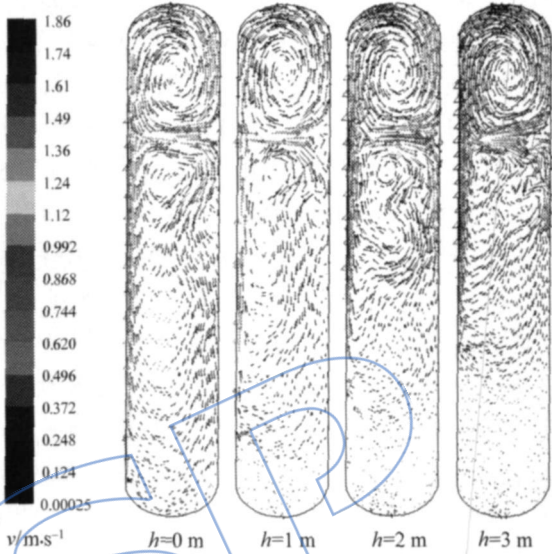


图 3 不同回流位置时贮箱内部速度场矢量图
Fig.3 Sketch of velocity vect or in tank with different return flow locations

动至相界面处气相沿壁面溢出,液相则沿自由相界面向右运动,到达贮箱右侧壁面后改变方向继续向下运动,从而在液相区形成了顺时针方向的速度旋涡.沿右侧壁面向下运动的流体运动方向与浮升力方向相反,因此向下运动速度逐渐减小.气枕区域受到相界面处流场的影响,在气枕区形成了逆时针方向的速度漩涡,气枕中心区强度较弱.由于气枕区与液枕区速度漩涡的叠加影响,导致自由相界面处速度增大,流场扰动加剧,相界面处于非稳定状态.图4为不同回流位置的贮箱底部区域速度场矢量图.由图可知,液氧贮箱回流口

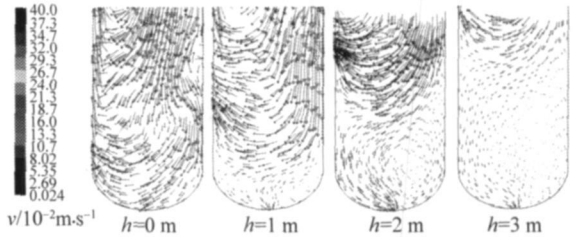


图 4 不同回流位置时贮箱底部区域速度场矢量图
Fig.4 Sketch of velocity vector in bottom with different return flow locations

截面以下区域由于未受到回流流体的直接扰动, 流体速度很小. 沿右侧壁面向下运动的流体与进入贮箱的回流流体在回流口高度的截面处汇合, 由于速度大小的差异, 导致右侧向下运动的流体被分流, 一股被高速回流流体卷吸沿壁面向上运动, 另一股则改变运动方向, 在贮箱底部形成逆时针方向速度漩涡. 比较四种不同回流位置的贮箱内部速度场矢量图发现, 随着回流位置的提高, 由于回流流体速度增大, 回流口截面以上区域的扰动加强, 流场及相界面处速度逐渐增大, 气枕区速度场逆时针旋涡增强. 而回流口截面以下区域逐渐扩大, 扰动相对减弱, 流体速度减小, 底部流场更接近静止状态.

图 5 为不同回流位置的液氧贮箱在自然循环进行至 120 min 时刻贮箱温度场分布云图. 根据低温液体热分层理论, 入侵热量大部分聚积在热边界层内, 伴随热流体的向上运动入侵热量逐步扩散, 热边界层厚度则沿贮箱高度方向逐渐增加. 由图 5 可知, 高速回流流体在向上运动过程中, 因被内部过冷液体冷却温度逐渐降低. 热边界层及气枕区的热量伴随回流流体的运动逐步扩散, 贮箱内部液氧主体区出现轴向温度分层现象. 回流口截面以上区域扰动强烈, 流场速度较大, 因此热量主要以对流方式传递. 回流口截面以下区域未受到回流流体的直接影响, 流场速度很小, 底部区域几乎趋于静止状态, 因此热量则主要以导热的

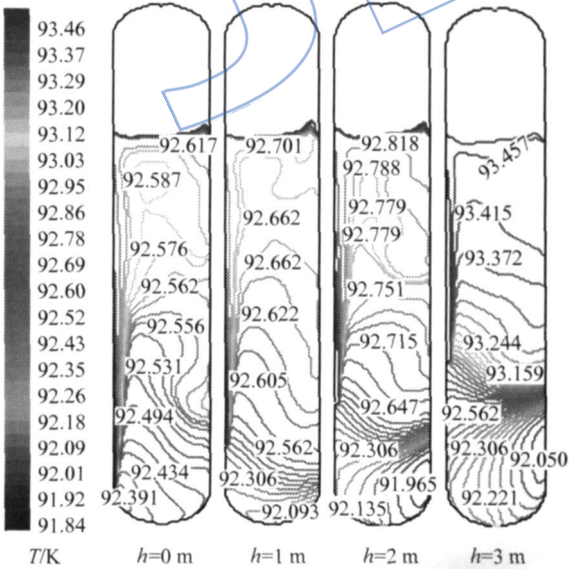


图 5 不同回流位置时贮箱内部温度场等值线图
($t = 120 \text{ min}$)
Fig. 5 Contours of tank temperature field with different return flow locations at 120 min

方式逐层向下传递. 由图 5 可知, 随着回流口位置升高, 回流流体速度增大, 回流口截面以上区域扰动增强, 对流传热强化, 所以贮箱主体温度升高且温度变化率增大. 回流口截面以下区域扰动影响逐渐减弱, 温度降低, 过冷度增大, 过冷液体含量增加, 热分层趋势增强, 底部区域的逆时针漩涡范围逐渐扩大, 过冷液体在逆时针速度涡的驱动下逐渐向下端封头右侧缓慢偏移, 因此底部温度分层逐渐由轴向转变为径向. 当回流口高度处于 $h = 2 \text{ m}$ 位置时, 贮箱底部液氧的过冷度最大, 过冷液体含量相对最多. 随着回流口位置的继续提高, 回流口截面以上区域扰动加剧, 对流传热能力增强, 因此贮箱主体区域温度快速升高, 从而导致回流口截面以上区域与贮箱底部之间温差增大, 回流口截面以下区域逐层导热能力显著提高, 所以当回流口位置位于 $h = 3 \text{ m}$ 时, 贮箱底部区域温度明显升高.

图 6 为不同回流口位置的液氧贮箱在自然循环至 120 min 时刻中心线温度变化曲线. 由图可知, 当回流口在 $h = 0 \text{ m}$ 位置时, 向上运动的回流流体几乎对整个贮箱内部场产生直接扰动影响, 整场温度趋于均匀, 液氧过冷度最小. 随着回流口位置提高, 回流管出口流体速度增大, 回流口截面以上区域扰动增强, 液氧主体区域温度逐渐升高,

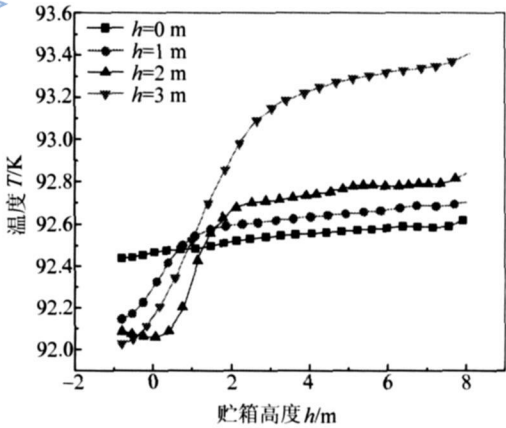


图 6 不同回流位置时贮箱中心线温度曲线
($t = 120 \text{ min}$)

Fig. 6 Variation of centerline temperature with different return flow locations at $t = 120 \text{ min}$

底部区域扰动相对减弱, 温度降低, 轴向温差逐渐增大. 当回流口在 $h = 2 \text{ m}$ 高度时, 贮箱底部区域温度最低, 过冷液体含量最大. 当回流位置在 $h = 3 \text{ m}$ 时, 由于贮箱底部导热能力增强, 底部区域温度升高, 过冷液体含量逐渐减少. 比较四种不同回流位置的贮箱中心线温度曲线发现, 随着回流位

置提高,回流口截面以上主体区域温度逐渐升高且温度变化速率增大,贮箱轴向温差增大。

为了定量的分析回流口位置对内部场的影响,分别计算不同回流位置时贮箱内部不同高度区域温度进行比较。图7为自然循环至120 min时刻不同回流位置的贮箱内部各区域过冷液体的平均温度曲线。由图可知,随着回流位置的提高,贮箱内部液体的平均温度逐渐降低,过冷液体含量增加。当回流口位于 $h=2\text{ m}$ 时,贮箱内部平均温度相对最低,过冷液体含量相对最多。当回流口升高到 $h=3\text{ m}$ 时,由于贮箱底部导热和回流口截面以上区域对流传热能力均明显提高,所以液体平均温度升高,过冷液体含量减少。

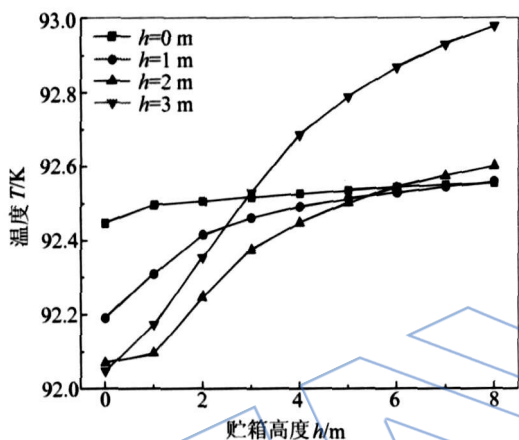


图7 不同回流位置时贮箱内部不同区域过冷液体的平均温度($t=120\text{ min}$)

Fig. 7 Average temperature of different regions with different return flow locations at $t=120\text{ min}$

由贮箱内部场温度分布云图可知,大量过冷液体主要贮存于贮箱底部区域,因此选取不同回流位置的贮箱0 m截面作为研究对象,分析截面平均温度随时间的变化规律,根据温度变化曲线判断贮箱内部不同温度过冷液体的含量,同时可作为火箭延迟发射时间的参考。图8为不同回流位置的贮箱在0 m高度的截面平均温度随时间的变化曲线。由图可知,当回流口位于 $h=0\text{ m}$ 时,由于回流流体的整场扰动,0 m截面的平均温度明显高于其他回流位置贮箱对应的截面温度,并且温度随时间变化曲线的斜率逐渐增大,截面温度升高最快,相对能够保证的延迟发射时间最短。随着回流位置的提高,不同回流位置贮箱0 m截面处流场的速度相对减小,温度开始升高的时刻逐渐延迟。相比较回流口位于 $h=2\text{ m}$ 时,自然循环进行至约60 min时0 m截面才开始温度升高,并

且温度变化最小,相对能够保证的延迟发射时间最长。当回流口位于 $h=3\text{ m}$ 时,由于贮箱底部的导热趋势增强,所以0 m截面温度变化时刻较回流口位于 $h=2\text{ m}$ 的贮箱提前,在自然循环过程中温度升高趋势强于 $h=2\text{ m}$ 回流位置的贮箱。

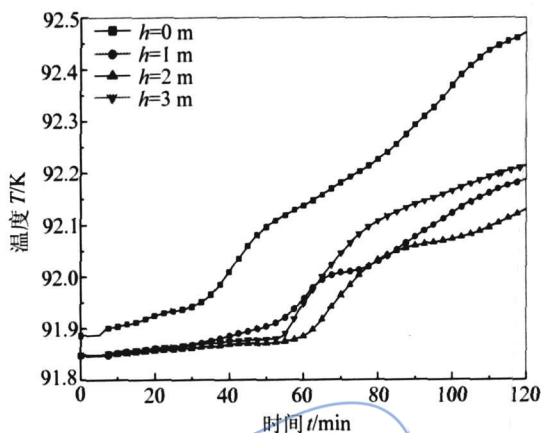


图8 不同回流位置时贮箱 $h=0\text{ m}$ 截面平均温度随时间变化曲线

Fig. 8 Variation of section average temperature with time at the height $h=0\text{ m}$ with different return flow locations

3 结论

1) 随着回流口位置提高,回流口截面以上区域温度升高且温度变化率增大,底部区域扰动逐渐减弱,温度降低,贮箱主体与底部区域之间温差逐渐增大。当回流位置高于2 m以上时,贮箱内部导热趋势增强,底部区域温度开始逐步升高。

2) 贮箱回流口截面以上区域形成轴向温度分层。随着回流口位置提高,贮箱内部最低温度区域逐渐向底部封头右侧偏移,底部区域温度逐渐降低且温度分层由轴向逐渐转变为径向。

3) 当回流口在 $h=2\text{ m}$ 位置时,贮箱底部区域过冷度最大,过冷液体含量相对最多,相对延迟发射时间最长,液氧品质最好,因此 $h=2\text{ m}$ 为相对最佳的回流高度。

参考文献:

- [1] 陆柳柳,匡波,陈宏. 低温气液两相流数值计算[J]. 低温与超导, 2005, 33(1): 27-31.
LU Linliu, KUANG Bo, CHEN Hong. Numerical simulation of cryogenic two phase flow[J]. Cryogenics and Superconductivity, 2005, 33(1): 27-31. (in Chinese)
- [2] 章谭云,李世模. 液氢热分层的数值模拟[J]. 浙江大学学报(工学版), 1992, 26(1): 98-103.
ZHANG Tanyun, LI Shimo. Numerical simulation for

thermal stratification of liquid hydrogen[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 1992, 26(1): 98-103.

[3] Das S P, Chakraborty S, Dutta P. Studies on thermal stratification phenomenon in LH2 storage vessel[J]. Heat Transfer Engineering, 2004, 25(4): 54-66.

[4] Tatom J W, Brow W H, Knight L H, et al. Analysis of thermal stratification of LH2 in rocket propellant tank[J]. Advances in Cryogenic Engineering, 1964, 9: 265-272.

[5] Gursu S, Sherif S A, Veziroglu T N, et al. Analysis and optimization of thermal stratification and self pressurization effects in liquid hydrogen storage systems Part 1: Model development[J]. Journal of Energy Resources Technology, 1993, 115(9): 221-227.

[6] Gursu S, Sherif S A, Veziroglu T N, et al. Analysis and optimization of thermal stratification and self pressurization effects in liquid hydrogen storage systems Part 2: Model results and conclusions[J]. Journal of Energy Resources Technology, 1993, 115(9): 228-232.

[7] Lin C S, Hasan M M. Numerical investigation of the thermal stratification in cryogenic tanks subjected to wall heat flux[R]. Orlando, Florida: 26th Joint Propulsion Conference, AIAA-90-2375.

