

新型运载火箭射前预冷液氧贮箱热分层的数值研究

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, 710049, 西安; 2. 北京宇航系统工程研究所, 100076, 北京)

摘要: 针对新型运载火箭液氧贮箱的热分层现象, 采用计算流体力学(CFD)技术对液氧贮箱内部的物理场进行数值模拟, 揭示了贮箱内部温度场及速度场的分布规律, 并分析了液氧热分层的形成过程及原因。研究表明: 回流口截面以上区域的传热以对流方式为主, 底部区域则主要是逐层导热; 贮箱内部主体区域形成轴向温度分层, 底部区域产生径向温度分层, 最低温度区域偏移至底部封头右侧; 气枕区形成逆时针速度旋涡, 液相主体区产生顺时针速度旋涡, 贮箱底部由于流场影响产生逆时针速度旋涡。

关键词: 液氧贮箱; 运载火箭; 推进剂; 热分层

中图分类号: V421.33 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2008)09-1132-05

Numerical Investigation of Thermal Stratification in Liquid Oxygen Tank for New-Style Launch Vehicle During Ground Precooling

CHENG Xianghua¹, LI Yanzhong¹, CHEN Erfeng¹, ZHANG Huazhao²

(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: Aiming at the thermal stratification in liquid oxygen tank of new-style launch vehicle, a numerical investigation was performed for physical field of tank based on computational fluid dynamics (CFD) technique to depict the temperature distributions and velocity fields, and then to analyze the development of thermal stratification. The results show that the convection heat transfer plays an important role in the bulk above the return flow section, and heat conduction arises only in the bottom region. The axial thermal stratification is produced in the main range of tank and the radial stratification appears at the bottom, and the lowest temperature region moves towards the right of bottom header. The anticlockwise velocity vortex is formed in gas region while a clockwise vortex is presented in the area of liquid phase, whereas the velocity vortex in the bottom changes from clockwise to anticlockwise due to the transformation of flow field.

Keywords: liquid oxygen tank; launch vehicle; propellant; thermal stratification

液氧贮箱是新型运载火箭必备的燃料贮存和供给设备, 它在发射前由地面装置充灌完毕, 经过较长时间的地面停放和发动机预冷阶段, 并在点火之前补充满仓, 以保证在箭体升空过程中向发动机连续提供过冷低温液体燃料。由于在地面停放阶段的外部自然对流及飞行过程中的气动热等原因, 导致贮箱内部与外部环境之间形成一定的温度梯度, 内部

近壁面区域的流体温度升高, 在浮升力的作用下沿壁面向上运动, 从而在贮箱高度方向形成温度梯度, 即热分层现象。研究表明, 装有低温液体的贮箱无论在地面停放还是高空飞行过程中, 都不同程度地存在热分层现象^[1-3]。热分层现象不但直接影响液氧的蒸发和贮箱内部的压力变化, 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,导致发射失败.因此,低温液体热分层现象是新型运载火箭液氧贮箱设计中需要重点考虑的问题.

目前,与低温贮箱热分层相关的计算分析与实验研究国内外已有相关文献报导.文献[4-5]对火箭液氢推进剂的热分层问题进行了相关实验研究,并分析了振荡与晃动对液氢热分层现象的影响.文献[6]采用涡流函数法对液氢的热分层现象进行了数值分析,得出了相界面温度与外部热流密度、液氢填充率和时间的关系.文献[7]选用水作为工质进行了水热分层现象的可视化实验,并且采用数值模拟的方法对圆柱形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.文献[8-9]分析了液化天然气贮槽内分层现象形成的原因、分层稳定性和破坏性的机理以及分层的存在对各个液体层之间传热和传质的影响,并给出了此种情况下热流率和质流率的计算关联式.从现有文献资料可知,目前大多数研究主要集中在低温液体贮罐的热分层方面,而对带有循环预冷回路的运载火箭液氧贮箱物理场的分布规律及热分层现象的研究还没有文献报道.液氧贮箱结构庞大,并且液氧自身的物性特殊,进行可视化实验研究非常困难.因此,本文采用计算流体动力学(CFD)技术对带有循环预冷回路的液氧贮箱内部温度场和速度场进行数值模拟,揭示贮箱内部物理场的分布规律,分析液氧热分层的形成过程及原因,以期对运载火箭动力系统的设计论证提供理论支持.

1 模型建立与边界条件

如图1所示,液氧从贮箱流入输送下降管,经过泵前阀、泵腔、排放管、回流上升管和回流出口阀等回到贮箱,完成发动机循环预冷,自然循环预冷是利用输送下降管与回流上升管内流体的密度差作为驱动力,进行发动机的射前预冷^[10].液氧贮箱由圆柱筒体及上、下2个椭圆型封头组成,回流口位于下端封头上部 $h=2\text{ m}$ 位置.贮箱顶端开有排气活门,用来排放气氧,从而保持气枕区压力恒定.贮箱侧壁和底部封头用 0.02 m 厚的发泡材料包裹,根据实际情况按第三类边界条件处理,上端封头则视为绝热边界.由于三维箱体体积较大,但局部尺寸较小,故网格采用整体粗化和局部细化相结合的方法划分.考虑到计算的效率及精度,本文采用二维的简化模型,根据相似原理将三维边界条件转化为二维边界条件(见表1).液氧贮箱内存在自由相界面,因此计

算中选用VOF(流体体积函数法)模型来解决自由表面流问题.另外,液氧贮箱中存在低温相变问题(既含有沸腾相变,又含有冷凝相变),而软件FLUENT自带的模型在解决相变问题时应用范围狭窄,功能也不够完善,为了对液氧贮箱内部场进行准确的数值模拟,针对贮箱内部物理场变化的实际问题,本文编写了相变模型的自定义程序,从而较好地解决了液氧贮箱中的相变问题和因相变而产生的能量转移问题.

图1 液氧贮箱结构图

表1 二维边界条件

位置	T/K	边界条件
回流管口	96.450	$v_{\text{in}}=0.503\text{ m/s}$
输送管口	91.837	$m_{\text{out}}=12.988\text{ kg/s}$
排气活门	110.00	$p_{\text{out}}=120\text{ kPa}$
侧壁及底部封头	288.15	$\gamma=0.94\text{ W/m}^2\cdot\text{K}$
顶部封头	288.15	绝热

注: v_{in} 为入口速度; m_{out} 为出口流量; p_{out} 为出口压力; γ 为定传热系数.

2 计算结果与分析

火箭在地面停放阶段,液氧贮箱内部要重复进行多次复杂的操作过程,如地面增压、补液与排气、自然循环预冷和过冷加注等,从而使得贮箱内部的压力场、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阶段,液氧贮箱的绝大部分操作过程是自然循环预冷,因此本文针对经过 5 min 氮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2为自然循环预冷过程中贮箱内部的速度场分布矢量图,可以看到回流流体以一定的速度从回流口进入液氧贮箱后,随边界层内的热流体向上运动,由于运动方向和浮升力方向相同,故回流液体速度逐渐增大,流场扰动增强.当热流体运动至气液相界面时,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,从而在液相区形成顺时针方向的速度旋涡.由于沿右侧壁面向下运动的流体运动方向与浮升力方向

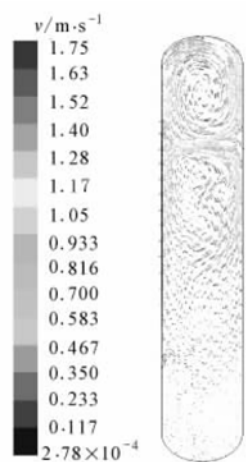


图2 液氧贮箱内部速度场分布矢量图

相反,因此向下运动的速度逐渐减小。从界面溢出的气体和界面蒸发的气体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旋涡,气枕中心区强度较弱,为了维持气枕区的压力恒定,部分气体从顶部排气活门排出。自由相界面受到气枕区与液枕区速度旋涡的叠加作用,速度增大,扰动加剧,处于非稳定状态,并且直接导致液相主体区域产生剧烈扰动。液氧贮箱回流口截面以下区域由于未受到回流流体的直接扰动,流场速度相对很小。

图3为自然循环预冷过程中液氧贮箱液相区温度随时间变化的等值线图。外部热量通过壁面入侵液氧贮箱,边界层温度升高导致出现密度差,边界层内的液体即在密度差的驱动下沿壁面向液体自由界面运动,从而形成自然对流的热边界层。由图3可知,入侵热量大部分聚积在热边界层内,随着热流体向上运动,入侵热量逐步扩散,热边界层厚度沿贮箱高度方向逐渐增加。高温回流流体在向上运动的过程中,因被内部过冷液体冷却而使温度逐渐降低。随着自然循环的进行,热边界层及气枕区的热量随回流流体的运动逐渐向下传递,贮箱内部液氧主体区出现轴向温度分层现象。回流流体进入贮箱后向上运动,对回流口截面以下区域没有明显扰动,所以自然循环开始阶段底部温度场均匀性好,过冷度最大。当自然循环进行到20 min时,热量逐渐传递至回流口截面,故回流口截面处温度升高速率加快,温度梯度增大,温度分层现象明显。当自然循环进行到60 min时,贮箱底部的温度分层趋势开始发生变化,至大约100 min时底部温度分层由轴向完全转变为径向,最低温度区域偏移至底部封头的右侧。

图4为自然循环预冷进行到120 min时,贮箱气枕区的速度矢量图和温度等值线图。由于贮箱顶部视为绝热边界,因此顶部封头右侧边界层内不存在明显的温度梯度。在逆时针流场的作用下,界面溢出气体及相界面气化产生的气体从顶部排气活门右侧水平出口排出,左侧出口将会带入部分外部气体,因此左侧出口附近的温度明显高于右侧。沿回流口侧壁面溢出的气体与气枕区速度旋涡反向叠加,导致左侧壁面处流场扰动增强,左侧热边界层厚度大

于右侧。由于逆时针速度涡的卷吸影响,整个气枕区温度呈不对称分布。图5为自然循环进行到120 min时,贮箱底部区域的速度矢量图和温度等值线图,可见相对于回流口截面以上区域,底部区域的速度明显变小,流场扰动减弱。沿右侧壁面向下运动的流体速度逐渐减小,在运动至回流口截面位置时与刚进入贮箱的回流流体相汇,导致大部分流体被回流流体向上带走,只有较小部分脱离回流流体,改变运动方向后沿底部封头左侧壁面向下运动,从而在底部区域形成逆时针方向旋涡。底部区域过冷液体在逆时针速度涡的驱动下沿壁面缓慢向右运动,因此热分层逐渐由轴向转变为径向。底部过冷液体偏移至区域右侧时,将会受到沿右侧壁面向下运动流体的抑制作用,导致贮箱最低温区停滞在底部封头的右侧区域。

图6为贮箱中心线温度(液相区)随时间的变化曲线。由于受到高温高速回流流体的影响,回流口截面以上区域流场扰动强烈,形成了非规则的顺时针速度场,所以造成贮箱中心线温度在高度方向的较小波动。由于在回流口截面以上液相区域相对于贮箱底部流场速度较大,故回流口截面以上区域的热量主要以对流方式传递。随着自然循环预冷的进行,液相区域整体温度快速升高,温度分层范围扩大,分层的速度逐渐减小,而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,因此对流换热可以忽略,底部区域主要以逐层导热为主,贮箱底部中心线的温度变化沿高度方向非常平滑,但温度梯度逐渐增大。由于传热方式的不同,液相主体区域的温升速率明显大于底部区域,两区域之间的平均温差随着自然循环的进行逐渐扩大。同时,气枕区的高温气体直接作用于相界面,使液相顶部形成温度梯度较大的热边界层,并促使液相主体产生轴向温度分层。当自然循环进行至120 min时,贮箱底部的过冷液体发生右偏,所以底部出现了沿高度正方向的中心线温度降低现象。

图7为自然循环120 min时,贮箱不同高度截面的平均温度随时间的变化曲线,图中分别选取了高度为0、2和4 m的截面。由于回流口位于2 m高度位置,回流口截面以上区域受到回流流体的扰动,所以4 m高度截面的温度升高速率明显大于0 m截面,而0 m截面未受到回流影响,截面平均温升速率最小。当自然循环进行至约20 min时,热边界层及气枕区的热量在回流流体的传递下开始到达回流口截面高度位置,从而回流口截面区域开始由初

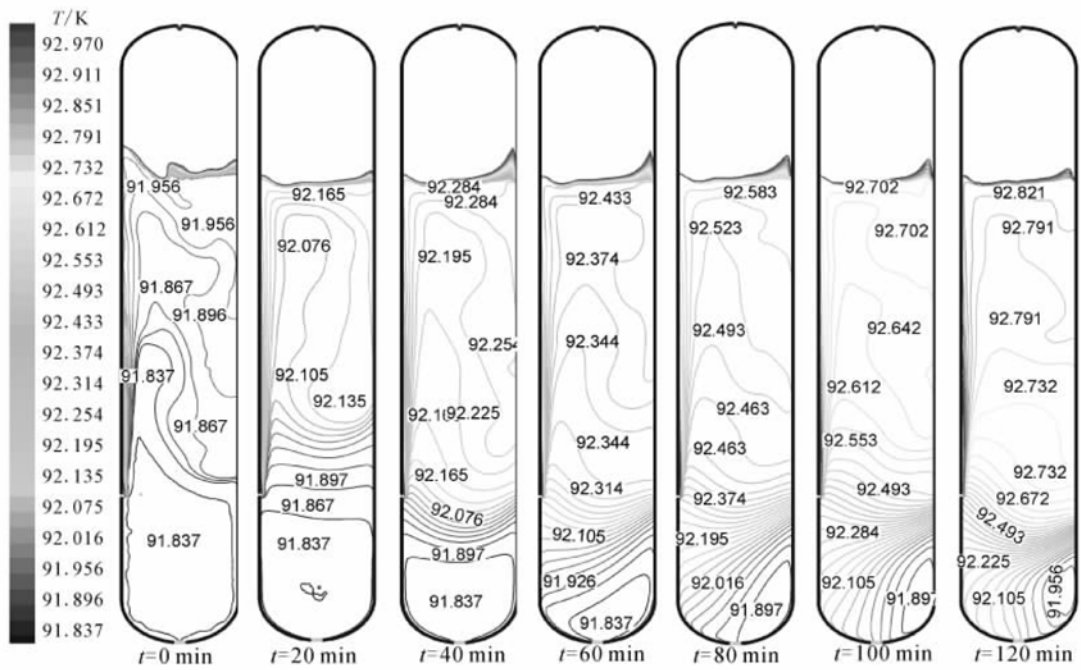
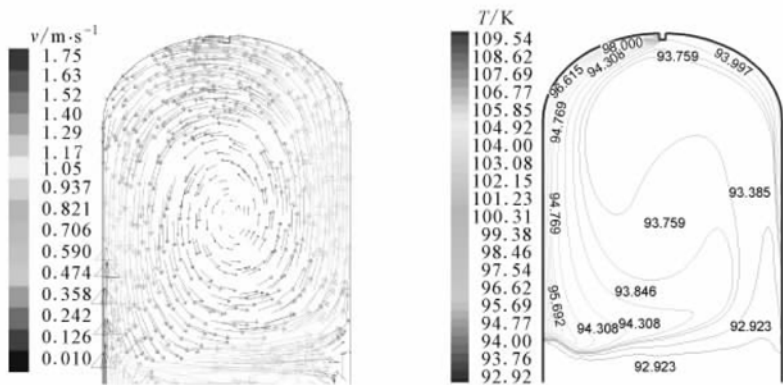
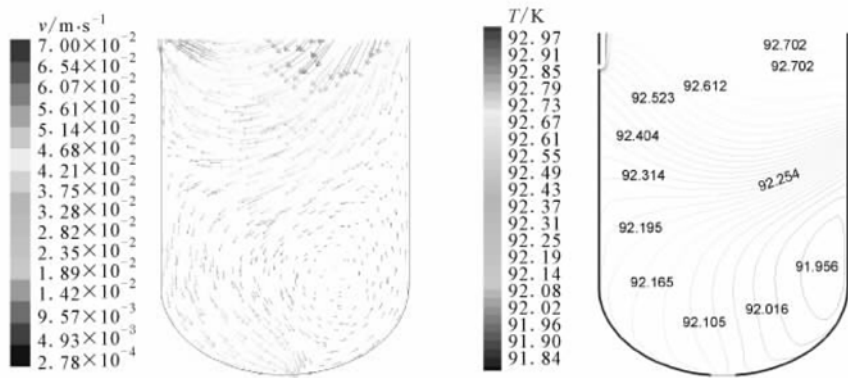


图3 自然循环过程中贮箱内部温度随时间变化的等值线图



(a)速度矢量图 (b)温度等值线图
图4 贮箱气枕区的速度矢量图和温度等值线图



(a)速度矢量图 (b)温度等值线图
图5 贮箱底部区域的速度矢量图和温度等值线图

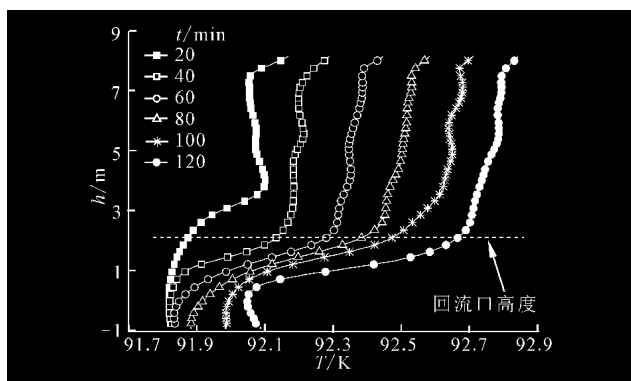


图6 贮箱中心线温度随时间的变化

始的逐层导热转变为对流传热,因此在自然循环前 20 min 内,2 m 截面的平均温度增加速率较小。从 20 min 以后,截面温度快速升高,温度增加速率变大。由于自由相界面受到气枕区与液相区反向速度场叠加的影响,液相上部区域扰动剧烈,并影响至液相主体区域,对流传热加强,沿高度正方向液氧贮箱各截面的平均温度升高速率逐渐增大。各截面平均温度随时间的变化趋势也说明,贮箱内部具有回流口截面以上区域以对流传热为主、底部区域以逐层导热为主的不同传热方式。

3 结 论

(1)在自然循环预冷过程中,由于回流流体的影响,贮箱内部液相区出现顺时针速度旋涡,气枕区出现逆时针速度旋涡。回流口截面以下区域由于受到回流流体与右侧向下运动流体的共同作用,流场转变为逆时针速度方向。

(2)回流流体进入贮箱后在浮升力的作用下向上运动,因此回流流体主要影响回流口截面以上的液相区域,对底部区域无直接影响。由于流场及回流流体的作用,回流口截面附近区域温度梯度最大,回流口截面以上区域主体温差很小,底部液体由于未受到直接扰动影响故过冷度最大,贮箱内部最低温区由于底部流场的变化而偏移并停滞于底部封头右侧。

(3)液氧贮箱回流口截面以上区域以对流传热方式为主,底部区域则主要以逐层导热方式为主。贮箱内部主体区域出现轴向温度分层,回流口截面以下区域由于逆时针速度旋涡的影响而转变为径向分层。

参考文献:

- [1] CLARK J A. A review of pressurization, stratification, and interfacial phenomena [J]. *Advances in Cryogenic Engineering*, 1965, 10: 259-283.
- [2] BAMETT D O, WINSTEAD T W, MCREYNOLDS

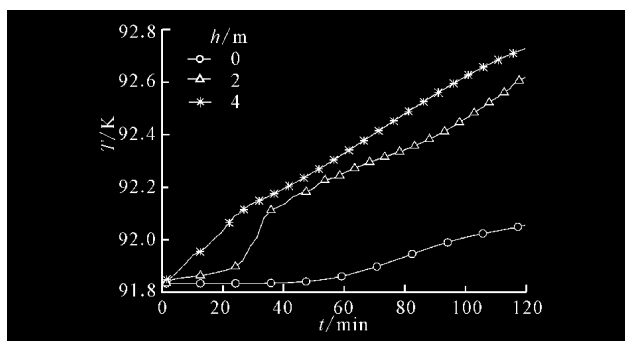


图7 贮箱不同高度截面平均温度随时间的变化

L S. An investigation of liquid-hydrogen stratification in a large cylindrical tank of the Saturn configuration [J]. *Advances in Cryogenic Engineering*, 1965, 10: 314-324.

- [3] 费林·尼·瓦, 布拉诺夫·亚·波. 液体低温系统 [M]. 赵运生, 催春娥, 译. 北京: 低温工程编辑部, 1993.
- [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] BAILEY T E, FEARM R F. Analytical and experimental determination of LH2 temperature stratification [J]. *Advances in Cryogenic Engineering*, 1964, 9: 254-264.
- [6] ZHANG Tanyun, HUANG Zhongping, LI Shimo. Numerical simulation of thermal stratification in liquid hydrogen [J]. *Advances in Cryogenic Engineering*, 1996, 41: 155-161.
- [7] 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.
- [8] 林文胜, 顾安忠, 李品友. 液化天然气的分层与漩涡研究进展[J]. *真空与低温*, 2000, 6(3): 125-132.
- LIN Wensheng, GU Anzhong, LI Pinyou. Program of research on LNG stratification and rollover phenomenon [J]. *Vacuum & Cryogenics*, 2000, 6(3): 125-132.
- [9] 程栋, 顾安忠. 液化天然气的贮存分层现象[J]. *深冷技术*, 1997(1): 13-15.
- CHENG Dong, GU Anzhong. The stratification phenomenon of LNG stored in tank [J]. *Cryogenic Technology*, 1997(1): 13-15.
- [10] 钟铁魁. 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学院, 2003.

(编辑 葛赵青)