

临近空间飞艇内部自然对流的流场特征仿真*

张俊韬, 侯中喜, 柳兆伟, 麻震宇

(国防科技大学 航天科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要:针对临近空间飞艇,对其内部氦气的自然对流特征进行了数值模拟。采用计算流体力学方法,并利用自编的用户自定义函数将外部的温度边界条件导入壁面网格。在不同的稳态条件下,通过对内部氦气压力、温度、速度的分布等流场特征参数的研究,分析了临近空间飞艇内部气体自然对流的运动特性及其影响规律,并对自然对流非稳态变化过程进行了初步的探索。仿真结果表明,在临近空间环境下,飞艇内部氦气的自然对流,对于内部氦气自身的热交换具有一定程度的促进作用,而对蒙皮受力和结构安全性影响很小。

关键词:自然对流;临近空间飞艇;数值仿真;流场特征

中图分类号: O351.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-2486(2015)04-009-06

Simulation on flow field characteristics of natural convection inside near space airship

ZHANG Juntao, HOU Zhongxi, LIU Zhaowei, MA Zhenyu

(College of Aerospace Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Aiming at the near space airship, the natural convection characteristics of the helium inside an airship were simulated numerically. On the basis of the computational fluid dynamics method and user-defined function, external temperature boundary condition was imported into the wall grids. Under conditions of different steady states, the motion characteristics and influence regulations of gas natural convection inside the airship were analyzed by researching the characteristic parameters of flow field, such as distribution of pressure, temperature, speed. Besides, the unstable change process of natural convection was also studied preliminarily. The simulation results show that natural convection of helium inside a near space airship has some active influence on heat exchange of inside helium, but the influence is very weak on stressed skin and structural safety.

Key words: natural convection; near space airship; numerical simulation; flow field characteristics

自20世纪70年代以来,以美国为首的西方国家开展了临近空间飞艇的相关研究,分析了长期驻空等难题^[1]。由于临近空间热环境中的诸多热源和影响因素,飞艇表面蒙皮的温度呈高低温区域复杂分布且随时间变化,同时飞艇内部的浮升气体(氦气)在受热不均的条件下发生密度的变化,进而由于重力作用而产生气体的流动,即自然对流的现象。而自然对流形成的流场特征和内部气体温度、压力等参数的分布变化反之也会影响表面蒙皮的温度、压力的分布,因此这是一个耦合影响的过程。

在之前众多有代表性的相关研究中,Lambert和Smith等^[2-3]指出,对临近空间飞艇进行热分析、研究热模型和仿真,并进行热特性试验是十分有意义的;Harada等^[4]对低空飞艇模型进行了相

关的试验研究,测得飞艇驻空期间蒙皮周向的温度分布;Lee等^[5]对飞艇由于内部气体运动而导致的浮力和质心变化进行了低空试验,计算了蒙皮的三维稳态温度分布。对自然对流而言,研究多集中于较为规则的简单外形上^[6-7],如圆球或者圆柱。Marc等^[8]采用旋转加热的方法对圆柱形飞艇内自然对流进行试验研究和仿真分析。对于实际飞艇外形,其内部自然对流的研究还不是很透彻。国内方面,方贤德等^[9]用两节点稳态模型计算了平流层飞艇平衡温度,得到表面蒙皮和内部气体的平均温度。然而,由于飞艇表面积很大,用平均温度代替表面蒙皮温度会造成较大误差,因此Li等^[10]进一步分析了半硬式飞艇蒙皮的温度分布,建立了相应的分析模型。而本文的着眼点在于,将上述方法得到的温度分布作为初

* 收稿日期:2015-04-10

基金项目:航空科学基金资助项目(20145788006)

作者简介:张俊韬(1986—),男,天津人,博士研究生,E-mail:zzt136@163.com;

侯中喜(通信作者),男,教授,博士,博士生导师,E-mail:hzx@sina.com

始边界条件,并采用计算流体力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)的方法,直接对整个内部流场进行数值计算。

1 物理模型和数值方法

1.1 物理问题描述

为简化研究对象,假设飞艇只有一个主气囊,内部充满一定质量的氦气(不考虑副气囊以及阀门放气等因素),同时在任何时刻飞艇均处在最大体积状态下(浮力不变从而不会发生上下运动,保持平飞巡航)。则飞艇在临近空间巡航驻留的状态下,外部的热条件随时间不断变化,导致内部氦气产生自然对流现象。在这个过程中,自然对流是一个不断变化发展的非稳态过程,然而由于一天之中在相对较短的时间尺度范围内(1到2个小时之内),热环境的变化还是相对较慢的,因此可以把一整天的自然对流变化过程离散成若干近似稳态的过程来研究,并通过分析这些不同时刻的自然对流状态来分析其变化规律。

1.2 数值方法

1.2.1 控制方程

适用于该问题的控制方程为三维定常可压 N-S 方程:

- 连续方程:

$$\operatorname{div}(\rho \mathbf{U}) = 0 \quad (1)$$

- 动量方程:

$$\rho(\mathbf{U} \cdot \nabla) \mathbf{U} = \rho \mathbf{F} - \operatorname{grad} P + \frac{1}{3} \operatorname{grad}(\mu \operatorname{div} \mathbf{U}) + \mu \nabla^2 \mathbf{U} \quad (2)$$

- 能量方程:

$$\rho(\mathbf{U} \cdot \nabla) T = \frac{k}{c_p} \nabla^2 T \quad (3)$$

其中: \mathbf{U} 是流体速度矢量; ρ 为密度; div 代表散度运算符; ∇ 代表 Hamilton 算子; \mathbf{F} 为彻体力矢量; μ 为动力粘度(为常数); P 为压力; grad 代表梯度算子; T 为温度; k 为热导率; c_p 为定压比热。

以上方程组为数值计算的控制方程,通过商业软件 FLUENT 的求解器进行求解。

1.2.2 边界条件

建立蒙皮表面的网格化单元,如图 1 所示;通过文献[11]中的方法建立蒙皮单元的热模型,并进行迭代计算即可得到任意时刻各网格单元的温度。

将上述每个网格单元所获得的温度值,通过

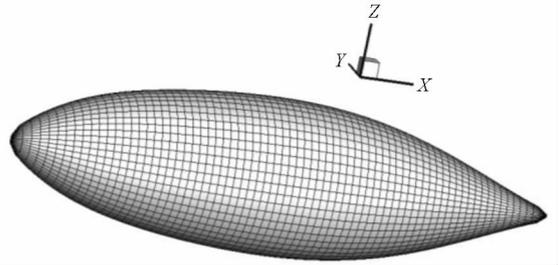


图 1 表面网格示意图

Fig. 1 Surface mesh sketch map

FLUENT 的用户自定义函数(User-Defined Function, UDF)进行加载,从而得到了这一时刻的表面蒙皮的温度分布(以下所有温度的单位均为 K),以此作为 CFD 方法的边界条件,其效果如图 2 所示。

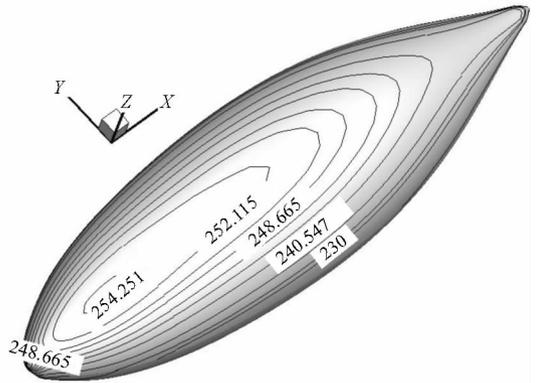


图 2 壁面温度分布

Fig. 2 Wall temperature distribution

1.2.3 确定流态

在纯粹自然对流中,浮力所引致的流动强度可用瑞利数 Ra 来判定:

$$Ra = \frac{g\beta\Delta T L^3 \rho}{\mu\alpha} \quad (4)$$

式中: ΔT 为温差; L 为特征长度; β 为热膨胀系数。

$$\beta = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p \quad (5)$$

α 为热扩散率:

$$\alpha = \frac{k}{\rho c_p} \quad (6)$$

根据 Ra 的值所在的范围,即可以判定流动是层流还是湍流。其中当 $Ra < 10^8$, 自然对流基本为层流;当 $10^8 < Ra < 10^{10}$ 时,流动为层流向湍流转捩的过渡阶段。根据表 1 中飞艇的设计参数,计算得到的瑞利数大于 10^{10} ,因此自然对流为充分发展的湍流,这一点在数值仿真中需要加以考虑。

表1 飞艇参数

Tab.1 Parameters of the airship	
飞艇	参数
长度	152.4m
最大直径	48.7m
体积	1 500 000 m ³
日期	2013-07-05
飞行高度	20km
平飞空速	5m/s
飞行姿态	迎角:0° 侧滑角:0°
大气温度	216.65 K

2 计算结果与分析

2.1 流动特征及时间变化的影响

在文献[12]对单一时刻的自然对流状态进行分析的基础上,进行多时刻点的仿真计算和分析,具体计算参数依然如表1所示。此外,计算条件还包括:地点为北纬40°附近某地上空20km处,时间为2013年7月5日一整天的若干个典型时刻的状态(2小时间隔,即4:00,6:00,……,18:00,20:00,其中6:00前与18:00后的状态是一致的,因为这些时间段没有太阳辐射)。针对以上情况的自然对流状态进行仿真计算,仿真过程中,设置的飞艇飞行朝向为正南方向。

2.1.1 蒙皮温度极大值的变化

由图3可以看到,蒙皮温度的极大值曲线以正午12:00为中心呈近似对称结构分布。日出前和日落后的壁面最高温度在224K附近,同时,在有日照的日间时间段,壁面温度的极大值并不在正午12:00,而是在接近早晨8:00和傍晚18:00附近,约为254K。

分析这种现象的主要原因,具体来讲:对于某个蒙皮单元的热平衡方程:

$$\delta\rho c_p \frac{\partial T}{\partial \tau} = (q_i - \varepsilon_{ex}\sigma T^4) - h_{ex}(T - T_a) - h_{in}(T - T_g) \quad (7)$$

式中: δ 为厚度, ρ 为密度, C_p 为比热, τ 为时间; h_{in} 是内部自然对流换热系数; h_{ex} 为外部强迫对流换热系数; T_g 是内部氦气在这一瞬时的温度; T_a 是来流温度(恒定值); T 是单元温度; q_i 是单元外部吸收的总的辐射热流,包括直射太阳辐射、反射和大气散射以及地表红外辐射; ε_{ex} 是材料的表面发射率。

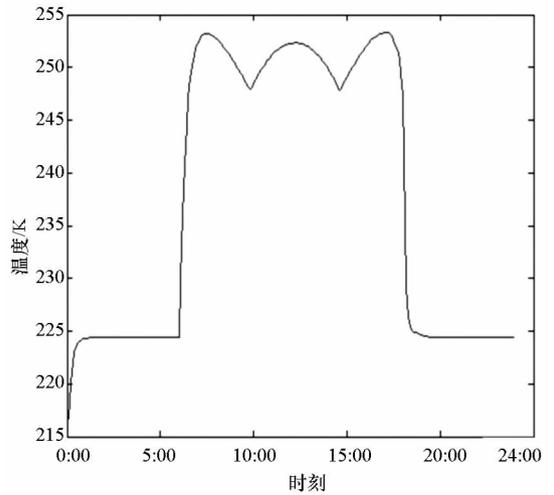


图3 蒙皮温度极大值的变化曲线

Fig.3 Curve of maximum temperature of skin

由式(7)可知,一个最高温度的局部单元需要获得的总热量最高。此单元在各个时刻所获得的太阳辐射、散射、反射辐射以及红外辐射等热量基本相同(忽略不同时刻透射率不同的影响),鉴于外界气体温度恒温,则外部的对流换热因素影响一致,因此影响温度极大值变化的因素就主要集中在内部的对流换热项以及蒙皮自身向外的红外辐射项。就对流换热项而言,这个温度最高的单元向内部气体进行对流换热热量最少的时刻就是内部气体温度最高的时刻,这时这个单元的温度才会达到极大值。

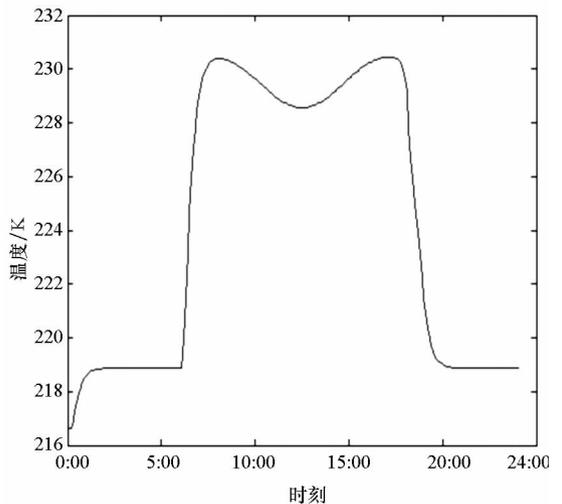


图4 内部氦气平均温度的变化曲线

Fig.4 Curve of average temperature of internal helium

同时,内部气体的平均温度变化曲线如图4所示,正午12:00时刻内部气体的平均温度并不是极大值,而是一个低谷,这是因为内部气体的平均温度的高低主要取决于太阳高度角和方位角以

及飞艇朝向的综合效果而导致的太阳辐射在飞艇上的总面积,面积越大总热量就越多,而前面已经提到,算例中飞艇的方向朝南,则可以推出刚刚日出和快要日落时的辐射面积最大,因而氦气平均温度的极大值就出现在早晨和傍晚附近。与此同时,蒙皮温度越高,向外辐射的热量也越多,反而会阻碍温度的进一步上升,因此蒙皮温度极大值的分布是以上影响因素的综合效果。

2.1.2 内部气体的温度分布

如图 5 和图 6 所示,虽然蒙皮边界上的温度分布不同,但内部气体的温度分布状态在不同的时间点是类似的(比较 10:00 和 12:00,其他时间状态未列出,但也类似),即由于自然对流的存在使得处于中间部分的气体温度分布出现一定程度的分层现象,靠上部的气体更加接近高温而靠下部的气体更加接近较低的低温,并且无论壁面的热边界条件呈何种角度,内部氦气的温度分布基本都在 Z 轴方向且由上到下逐渐分层过渡,温度由高到低。至此,说明蒙皮温度的角度分布变化对内部气体的温度分布规律没有影响,只影响内部气体的温度具体数值的高低。

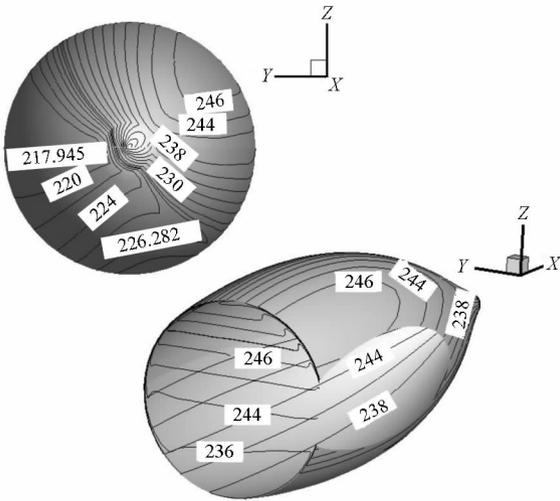


图 5 在 10:00 的温度分布

Fig. 5 Temperature distribution at 10:00

2.1.3 压力分布的不均匀性

压力不均匀性是指在某一时刻,内部气体压力的最小值与最大值的差值。虽然飞艇所经历的热环境在时刻变化,然而,由于自然对流所引起的腔内压力不均匀性的量级非常小,只有帕(Pa)以下的量级,如图 7 所示。

与此同时,在各个时刻,如图 7 所示,内部气体的压力分布形式基本上保持一致(依然以 10:00 和 12:00 比较为例),呈现出两端高中间低的分布状态,只是不同时刻对应的具体压力值略

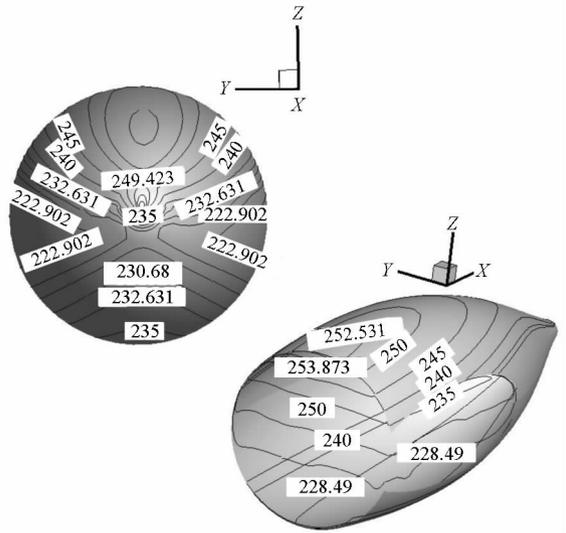


图 6 在 12:00 的温度分布

Fig. 6 Temperature distribution at 12:00

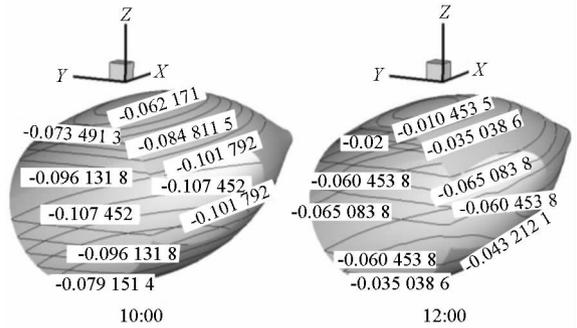


图 7 在 10:00 和 12:00 的压力分布

Fig. 7 Pressure distribution at 10:00 and 12:00

有不同。具体来讲,无论壁面的热边界条件呈何种角度,压力分布都在沿 Z 轴(重力所在的竖直方向)由中间向上下升高,但这种分布的不均匀性很小,因此可以说明自然对流所引起的压力分布不均基本不会对蒙皮的受力以及结构特性造成严重的影响。

2.1.4 速度最大值的变化

如图 8 所示,从一昼夜速度最大值的变化曲线来看,整个过程自然对流引起的氦气内部流动的最大速度不超过 2m/s。

而且,如图 9 所示,最大速度集中分布在壁面附近的周向和纵轴向上的环流,而其余大部分内部区域的流速小于 1m/s。因此可以认为,飞艇驻留段内部自然对流所导致的内部氦气流动从速度的量级上来看很小,流动比较微弱。

进一步分析,与蒙皮温度的极大值类似,氦气的最大速度同样出现在接近早晨 8:00 和傍晚 18:00 附近,最小速度出现在接近上午 10:00 和下午 14:00 附近,这种现象说明:在早晨 8:00 和

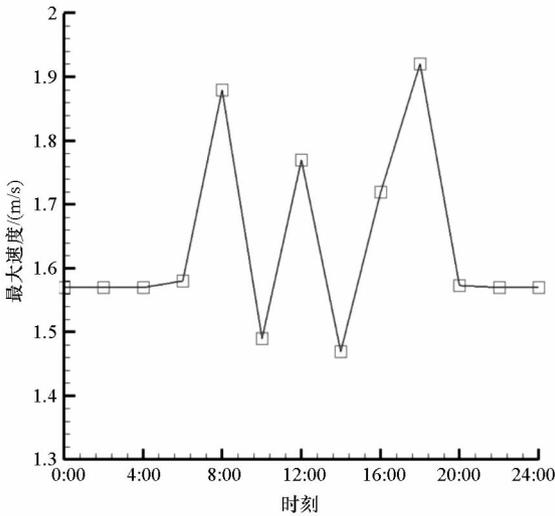


图8 速度最大值的变化曲线
Fig. 8 Curve of maximum velocity

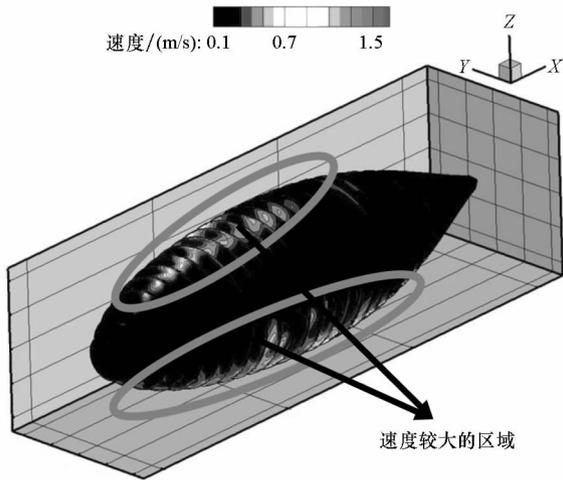


图9 在12:00的速度分布切片图
Fig. 9 Slices of velocity distribution at 12:00

傍晚 18:00 附近,氦气的自然对流较为强烈;而在上午 10:00 和下午 14:00 附近,氦气的自然对流相对微弱一些。

2.2 内部自然对流的非稳态运动过程研究

设定边界条件从早上 6:00 时刻为初值,下一时刻变为日出后的上午 8:00 的情况。温度边界条件的变化如图 10 所示。

以 10s 为时间间隔,仿真模拟了 15min 的内部自然对流非稳态流动过程。这里需要说明的是,实际情况下,8:00 的边界条件是从 6:00 缓慢变化而来的,而这里为简化研究问题,直接将 8:00 的蒙皮温度分布加载到在 6:00 已经达到稳定状态的自然对流的边界条件上去,即认为边界条件是由一个状态瞬时变化到了下一个状态。这样,虽然所设置的条件与实际情况有所出入,但是最

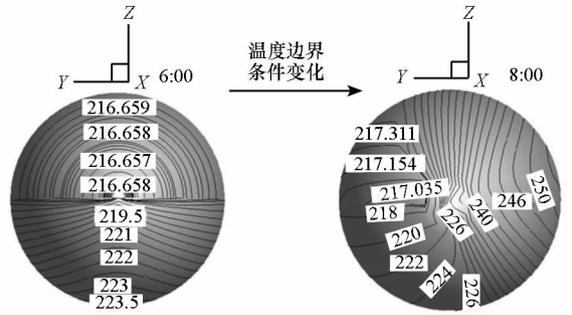


图 10 从早上 6:00 至 8:00 的壁面温度变换
Fig. 10 Change of the wall temperature from 6:00 a. m. to 8:00 a. m.

初和最终的状态是一致的,即中间自然对流过程只是过渡的时间有所不同,因此不影响变化过程的规律研究。以下主要从流动现象来分析温度分布的变化规律。

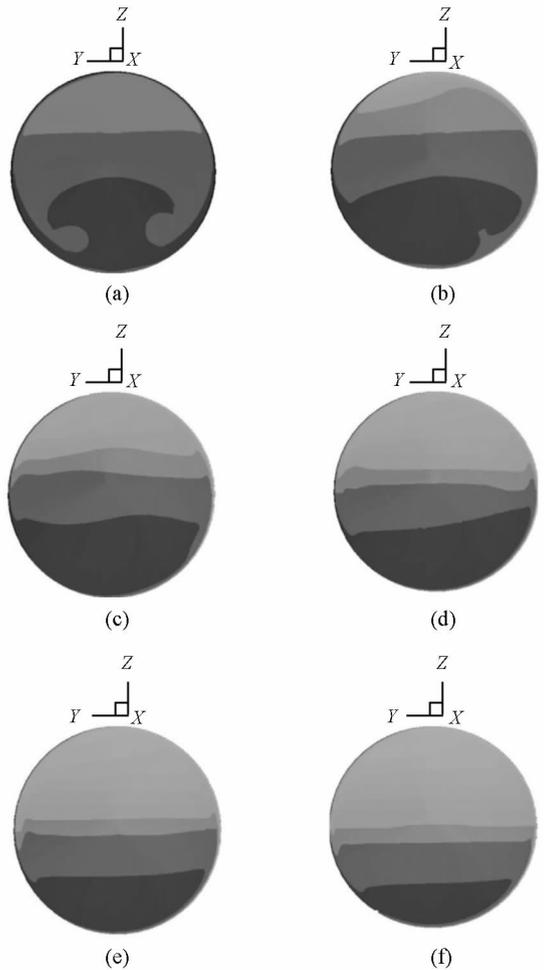


图 11 Y-Z 平面非稳态温度变化过程
Fig. 11 Process of unstable state temperature at Y-Z plane

如图 11(a) ~ (f) 所示,颜色越浅说明温度越高。取一个 Y-Z 平面,在初始状态下,显然由于热平衡,内部气体仍然存在稳定的自然对流状态,同时气体的整体温度较低(见图 11(a))。当出

现太阳辐照后,外界热边界条件瞬间变化,如图 10 所示,热壁面在右侧,冷壁面在左上侧,导致内部氦气在最贴近这两处的地方温度首先发生变化,分别趋向于高温和低温(见图 11(b)~(c)),进而高温气体由于密度较低则沿壁面上升,低温气体密度较大沿壁面下降,此即为自然对流的起始动因,同时由于流动的惯性,在较早的时间内,高低温气体的分布与垂直方向存在一小的角度(见图 11(d)),经过一段时间的过渡后,气体温度分布趋于均匀,同时氦气的整体温度也有明显的提高(见图 11(e)~(f))。

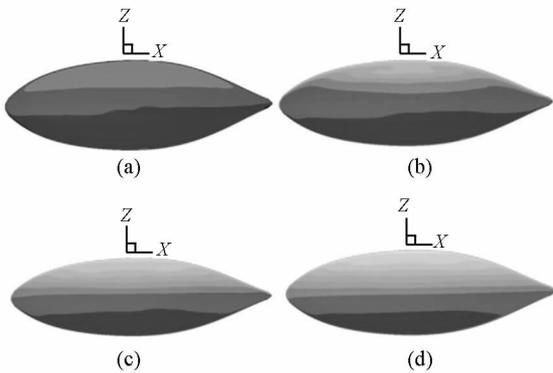


图 12 $X-Z$ 平面非稳态温度变化过程

Fig. 12 Process of unstable state temperature at $X-Z$ plane

如图 12 的温度分布变化过程所示,同样颜色越浅代表温度越高。取一个 $X-Z$ 平面,情况与 $Y-Z$ 平面基本类似,而且温度变化的情况要更简单直观。由于在此平面内,温度的边界条件即为上高下低,则上下两端的气体正好位于这两个区域,温度分层随时间逐渐明显变化(由(a)~(d)的变化),同时整体温度升高。

3 结论

在某一时刻的稳态自然对流条件下,内部氦气的压力呈现出有规律的分层现象,同时,其不均匀性很小。这表明自然对流所导致的内部压力不均匀性可以忽略不计;温度则呈现出从上到下由高温到低温逐渐过渡的情况;内部气体的流动速度较低,最大值不超过 2m/s ,其中大部分区域小于 1m/s ,与飞艇百米以上的尺度来衡量,可以说是比较缓慢和微弱的,不会对蒙皮受力和结构安全性造成影响。

对于不同时刻,尽管外蒙皮的温度分布不同,但其内部气体由于自然对流所引起的温度、压力、速度的分布规律没有明显的变化,说明在一昼夜内,自然对流的总体特性基本保持不变,即自然对

流使内部氦气的温度呈分层状态,而压力的不均匀性和内部流场的速度量级均较小。

对于非稳态过程,通过对不同时刻流场状态的分析,说明变化的温度边界条件是导致自然对流状态发生改变的直接动因。

参考文献 (References)

- [1] Stefan K. Thermal effects on a high altitude airship [C]// Proceedings of 5th Lighter-Than-Air Systems Conference, 1983.
- [2] Lambert C. Developing architectures for high altitude airship[C]// Proceedings of AIAA's 3rd Annual Aviation Technology, Integration, and Operations (ATIO) Forum, AIAA-2003-6781, 2003.
- [3] Smith M S, Rainwater E L. Applications of scientific ballooning technology to high altitude airships [C]// Proceedings of AIAA's 3rd Annual Aviation Technology, Integration, and Operations (ATIO) Forum, AIAA-2003-6711, 2003.
- [4] Harada K, Eguchi K, Sano M, et al. Experimental study of thermal modeling for stratospheric platform airship [C]// Proceedings of AIAA's 3rd Annual Aviation Technology, Integration, and Operations (ATIO) Forum, AIAA-2003-6833, 2003.
- [5] Lee Y G, Kim D M, Yeom C H. Development of Korean high altitude platform systems[J]. International Journal of Wireless Information Networks, 2006, 13(1): 31-42.
- [6] Rodger E F. Balloon ascent: 3-D simulation tool for the ascent and float of high-altitude balloons[C]// Proceedings of AIAA 5th ATIO and 16th Lighter-Than-Air Systems Technology and Balloon Systems Conferences, AIAA-2005-7412, 2005.
- [7] Das T, Mukherjee R, Cameron J. Optimal trajectory planning for hot-air balloons in linear wind fields [J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2003, 26(3): 416-424.
- [8] Marc H, Bernhard W, Von Wolfersdorf J. Natural convection inside airship [C]// Proceedings of 9th AIAA/ASME Joint Thermophysics and Heat Transfer Conference, AIAA-2006-3798, 2006.
- [9] 方贤德, 王伟志, 李小建. 平流层飞艇热仿真初步探讨 [J]. 航天返回与遥感, 2007, 28(2): 5-9.
FANG Xiande, WANG Zhiwei, LI Xiaojian. A study of thermal simulation of stratospheric airships [J]. Spacecraft Recover & Remote Sensing, 2007, 28(2): 5-9. (in Chinese)
- [10] Li X J, Fang X D, Dai Q M, et al. Modeling and analysis of floating performances of stratospheric semi-rigid airships [J]. Advances in Space Research, 2012, 50(7): 881-890.
- [11] 夏新林, 李德富, 杨小川. 复合热条件下椭球形封闭腔内低压气体的自然对流 [J]. 航空学报, 2010, 31(3): 453-458.
XIA Xinlin, LI Defu, YANG Xiaochuan. Natural convection of low pressure gas in ellipsoidal enclosure induced by combined thermal conditions [J]. Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica, 2010, 31(3): 453-458. (in Chinese)
- [12] 张俊韬, 侯中喜, 柳兆伟. 平流层飞艇内部氦气的自然对流研究 [C]. 第二届高分辨率对地观测学术年会, 长沙, 2013.
ZHANG Juntao, HOU Zhongxi, LIU Zhaowei. Research on natural convection of helium inside stratospheric airship [C]. 2nd China High Resolution Earth Observation Conference, Changsha, 2013. (in Chinese)