

平流层飞艇昼夜驻空蒙皮热特性研究

王晓亮, 谢炜程

(上海交通大学 航空航天学院, 上海 200240)

摘要: **目的** 分析平流层飞艇蒙皮在不同空速下的热特性, 为平流层飞艇蒙皮材料的选择以及其驻空性能的分析提供参考和指导。**方法** 基于CFD数值分析方法, 建立外部热源模型, 囊体内部自然对流和囊体外部强迫对流分析的综合方法。通过数值仿真分析典型飞艇在不同空速下的热特性, 得出飞艇囊体内部的氦气平均温度随着热环境的周期变化, 会产生周期性变化。**结果** 在1 m/s的较低空速下, 飞艇昼夜氦气温差达到46 K, 蒙皮昼夜最小温度出现在晚上, 约为180 K, 最大温度出现在正午时分, 温度约为280 K。在10 m/s的空速下, 飞艇昼夜氦气温差达到29 K, 蒙皮昼夜最小温度约为190 K, 最大温度为280 K。**结论** 在飞艇设计中, 蒙皮材料选择时考虑温度的影响。所建立的热分析方法以及得到的热特性, 可为平流层飞艇蒙皮材料的选择提供参考和指导。

关键词: 飞艇; 蒙皮热特性; 平流层; CFD

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2020.01.003

中图分类号: V274

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2020)01-0013-07

Thermal Characteristics Analysis of Stratospheric Airships Envelope

WANG Xiao-liang, XIE Wei-cheng

(School of Aeronautics and Astronautics, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

ABSTRACT: The paper aims to analyze the thermal characteristics of stratosphere airship envelope under different speed, and provide reference and guidance for the selection of the stratosphere airship envelope material and its in-empty performance. With the CFD method, the environment thermal model was built. The natural convection and forced convection analysis method were used comprehensively. Through the thermal analysis of envelope of general stratospheric airship, the characteristics of thermal change of envelope were obtained. It was resulted that the average temperature of helium in the airship capsule changed periodically with the thermal environment. At low airspeed of 1 m/s, the helium average temperature difference of the airship reached 46 K. The envelope maximum and minimum temperature were 180 K and 280 K, which occurred in the evening and noon respectively. The average temperature difference of helium was 29 K at 10m/s of airspeed. The maximum and minimum temperature of the envelope was 190 K and 280 K respectively. In design of airship, the influences of temperature should be taken into consideration in selection of envelope. The thermal characteristics analysis method and the conclusions can provide reference of the chance of envelope material of airship.

KEY WORDS: airship; thermal characteristics of envelope; stratosphere; CFD

收稿日期: 2019-09-20; 修订日期: 2019-11-18

Received: 2019-09-20; **Revised:** 2019-11-18

基金项目: 国家自然科学基金项目基金(61733017); 上海市自然科学基金(18ZR1419000)

Fund: The National Natural Science Fund Project(61733017); Shanghai Natural Science Fund(18ZR1419000)

作者简介: 王晓亮(1975—), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为流体力学。

Biography: WANG Xiao-liang(1975—), Male, Doctor, Associate researcher, Research focus: fluid mechanics.

平流层飞艇以其在临近空间长期驻留所具有的显著优势,得到各国的广泛深入研究^[1]。平流层飞艇在其驻空过程中,外界热环境相对复杂,且具有周期时变性。平流层大气密度仅为地面的10%左右,空气相对稀薄,因此飞艇体积均较大,在驻空过程中,其结构自身以及内部的气体的热特性受自身材料热特性、外部环境热源及囊体内外换热方式的影响极大。周期性时变的太阳辐射和其他环境热源,以及囊体内外的对流换热导致飞艇蒙皮及内部气体的温度场昼夜温差很大,从而会影响飞艇的浮力、蒙皮的应力水平以及整个飞艇的变形特性,从而会改变其驻空高度、飞行姿态及轨迹,局部过热过冷和应力增大也可能会导致蒙皮的膨胀变形乃至破坏。因此建立准确的平流层飞艇热特性模型,并分析飞艇蒙皮及内部填充气体的温度,对于飞艇结构设计及操控等方面均具有重要的意义。

在20世纪80年代,国外许多学者就开始对飞艇热特性开展研究。近年来,国内学者对平流层飞艇热特性模型的研究也在持续发展,取得了一定的成果^[1]。2007年,方贤德等^[8]建立了瞬态运动方程和传热模型。2009年,徐向华等^[9]用Fluent对飞艇进行了仿真分析。2013年,Garde等^[10]研究发现,相同条件下南瓜形气球的氦气温度及蒙皮平均温度均高于球形气球。2014年,戴秋敏^[11]详细研究了飞艇晴空时的太阳辐射、长波辐射以及强迫换热模型。2018

年,刘婷婷等^[12]分析了驻空期间,太阳能电池等效面积热阻、转换效率及铺装面积对飞艇热温度昼夜变化规律的影响。

目前对于飞艇热特性的研究方法主要以近似方法为主,特别是飞艇囊体内外的对流换热,一般采用一些典型的经验公式进行模拟。对于飞艇自身,其所处环境时变及其外形特点,内部自然对流换热和外部混合对流换热与一般的经验公式具有一定的差别,需要针对该方面进行精确建模,以便于形成可靠准确的热仿真模型。

文中在前人研究的基础上,将相关的热源模型与高精度的CFD数值求解方法相结合,实现了飞艇热特性的高精度仿真。基于形成的热仿真模型对典型飞艇昼夜驻空条件下,蒙皮和内部氦气的热特性进行了仿真分析,给出热特性的变化规律。

1 热源与CFD耦合的飞艇热力学模型

1.1 飞艇热源模型

处于平流层的飞艇,受到的热源主要可以分为三类:太阳短波辐射、长波辐射以及对流换热。飞艇受到具体的各热源如图1所示,各热源的详细计算方法参考戴秋敏^[11]的热源模型。

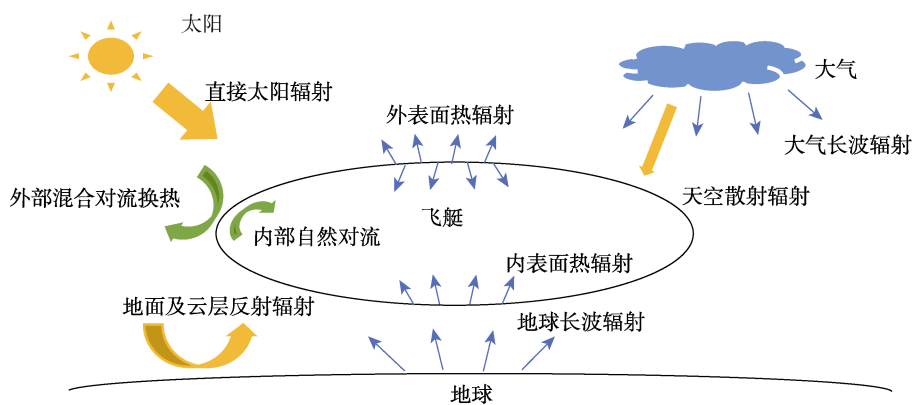


图1 平流层飞艇热环境
Fig.1 Thermal environment of stratospheric airship

1.2 飞艇内外对流换热模型

飞艇内外的对流换热是影响其热特性的一个关键因素。文中基于CFD数值计算方法得出其在不同热环境下的对流换热特性,相比于常规的基于经验公式的方法,可有效提高这方面的求解精度,从而可提高整个热模型的计算精度。

在CFD数值计算时,将整个飞艇的内外均进行流场网格剖分,如图2所示。飞艇内部介质为氦气,外部扰流的介质为空气。整个飞艇对流换热的特性依靠CFD热平衡方程求解完成。飞艇周围热源的加载通过FLUENT的UDF实现。

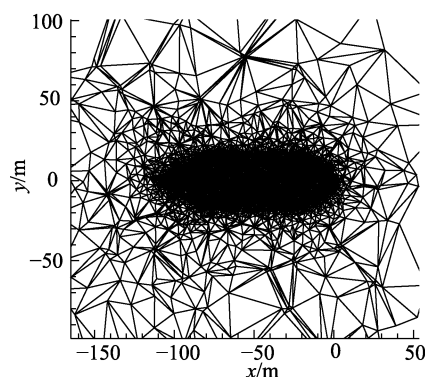


图2 飞艇流场网格
Fig.2 The fluid mesh of airship

1.3 飞艇热特性计算流程

首先通过 FLUENT 的 UDF 实现飞艇囊体热特性参数的设置, 以及外部各热源的计算和加载。对飞艇内外流场进行网格剖分, 然后导入 FLUENT 中设置相应的边界条件以及飞艇内外流体介质。最后进行非定常求解。在计算过程中, 通过监视得出氦气的平均温度以及囊体的最大和最小温度。飞艇驻空阶段热特性分析方法实现流程如图 3 所示。

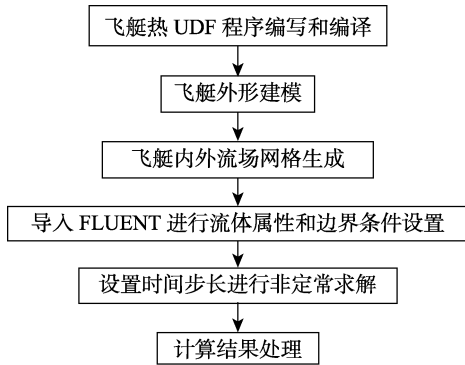


图 3 飞艇驻空阶段热分析方法实现流程
Fig.3 The flow chart of thermal analysis of stratosphere airship

2 飞艇热特性分析

2.1 飞艇蒙皮热特性及流场参数

飞艇蒙皮热特性及流场参数见表 1。针对典型长度为 100 m 左右的平流层飞艇, 在北纬 41°, 18 km 驻空高度 (大气密度为 0.121647 kg/m³, 环境温度为

表 1 飞艇蒙皮热特性及流场参数

Tab.1 Airship envelope thermal properties and flow field parameters

参数	参数值	参数	参数值
计算日期	$n=174.0$, 积日 n (春分 81, 夏至 174, 秋分 266, 冬至 356)	外表面太阳辐射的吸收率	0.23
飞艇的俯仰角	0 rad	外表面的发射率	0.80
飞艇的偏航角	0 rad	内表面的发射率	0.80
飞艇的滚转角	0 rad	厚度	0.0005 m
蒙皮的初始温度	216.5 K	密度	0.09, 0.0005 kg/m ³
氦气的初始温度	216.5 K	比热容	3600.0
蒙皮的红外透射率	0	地面反射系数	0.25
蒙皮的太阳透射率	0	球表面发射率	0.92

216.65 K) 下, 对其在不同空速下的昼夜驻空的热特性进行计算分析。

2.2 飞艇在 1 m/s 空速下的热特性

从图 4 可以看出, 飞艇囊体内部的氦气平均温度随着热环境的周期变化, 会产生周期性的变化。飞艇在夜间囊体内部的氦气具有较低的温度, 可低于环境温度约 12 K。随着太阳的升起, 囊内氦气温度会迅速增加, 然后温升速度会逐渐减小, 最终在正午达到 250 K, 即高于环境温度 34 K, 飞艇整个昼夜氦气温差达到 46K。另外, 整个囊体内部的氦气温度, 在不同的时刻具有不同的分布特点, 在正午时基本呈现水平梯度分布, 如图 5 和图 6 所示。

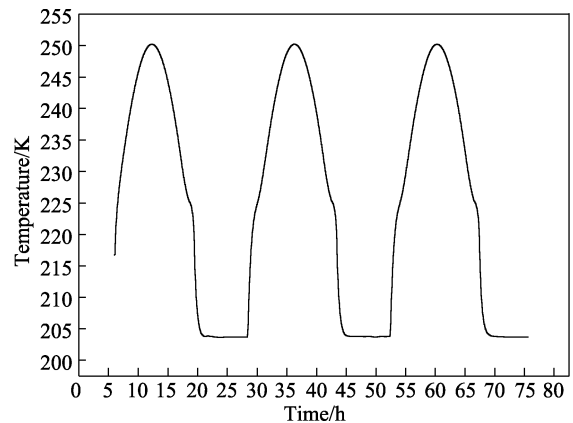


图 4 囊内氦气平均温度随时间的变化 (空速: 1 m/s)
Fig.4 The change of helium average temperature over time (Airspeed:1 m/s)

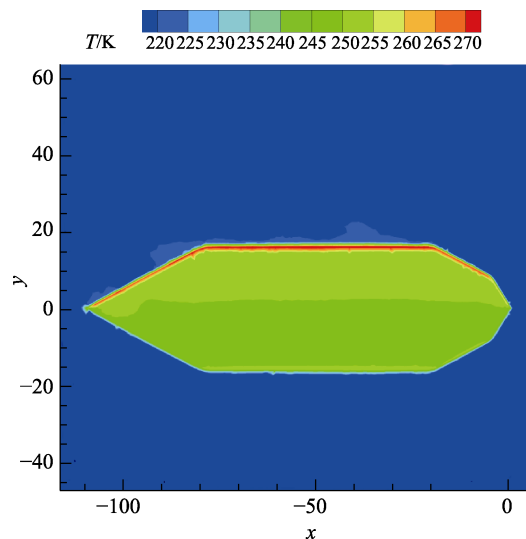


图 5 12 点时的内部氦气温度纵截面云图 (空速: 1 m/s)
Fig.5 The helium temperature distribution at 12:00 at XY plane (Airspeed:1 m/s)

从图 7 可得出, 由于太阳热源与飞艇间的相对位置, 飞艇上部蒙皮的温度明显高于下部。整个囊体上部蒙皮的温度分布随着太阳照射角度的变化而变化。

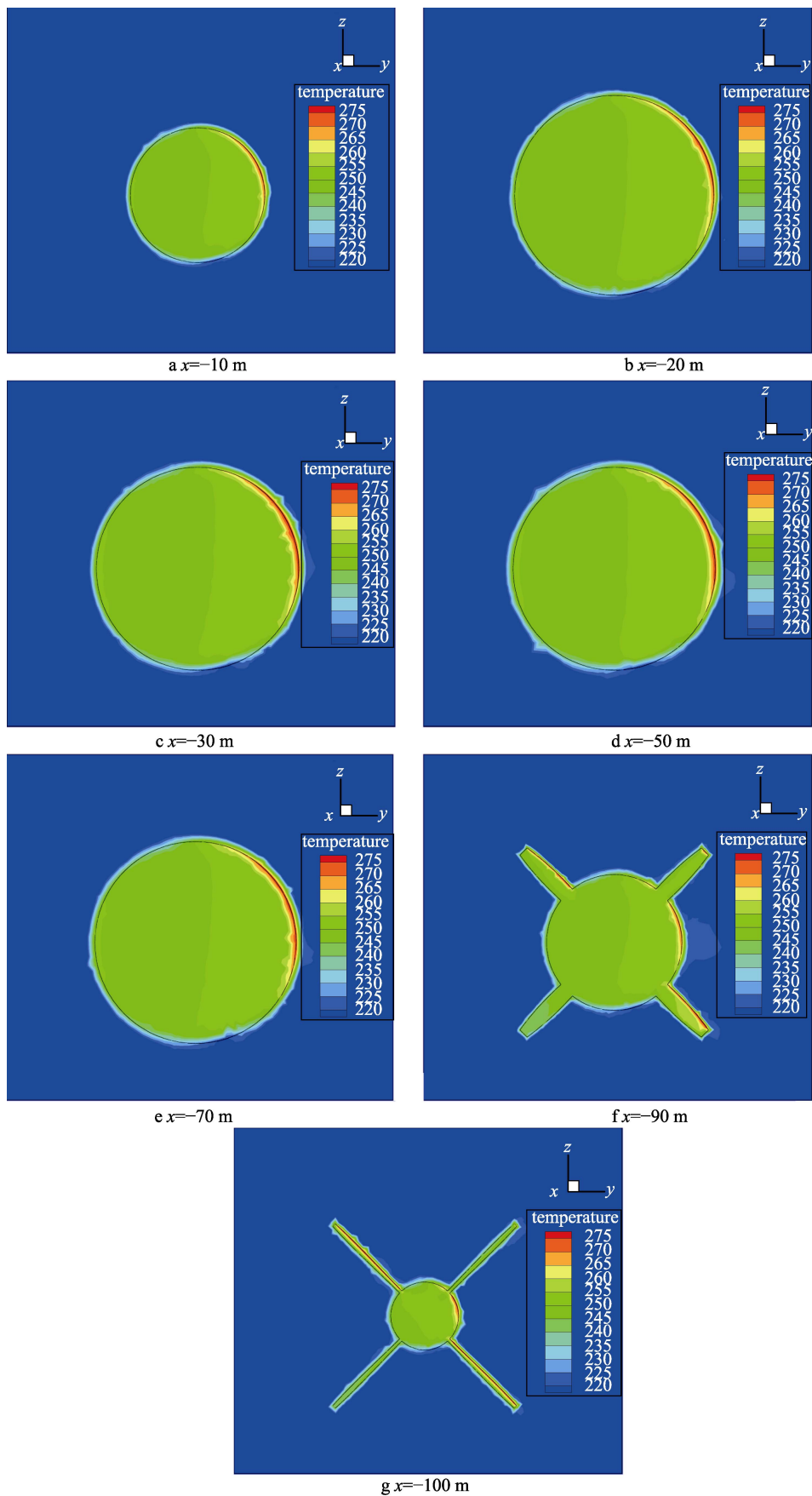


图6 12点时的内部氦气温度在不同横截面云图(空速: 1 m/s)
Fig.6 The helium temperature distribution at 12:00 at different XZ planes (Airspeed: 1 m/s)

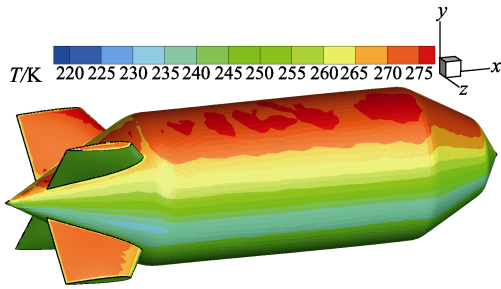


图 7 12 点时的蒙皮温度云图 (空速: 1 m/s)
Fig.7 The envelope temperature distribution at 12:00 (Airspeed:1 m/s)

如图 8 所示, 在驻空高度为 18 km, 大气密度为 $0.121\ 647\ \text{kg/m}^3$, 空速为 1 m/s 的条件下, 蒙皮昼夜最小温度出现在晚上, 约为 180 K, 最大温度出现在正午时分, 温度约为 280 K。蒙皮的最大和最小温度相差约 100 K, 故需要在飞艇设计中, 蒙皮材料选择时考虑该因素的影响。

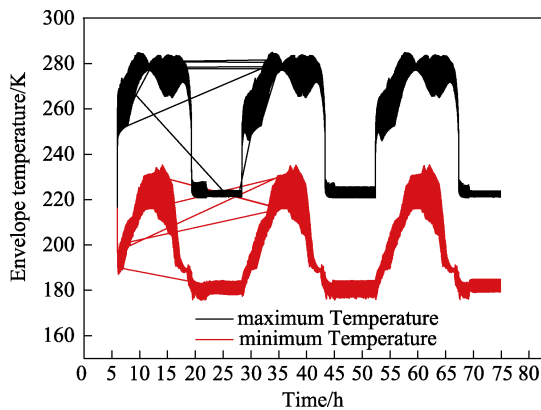


图 8 蒙皮最大最小温度随时间的变化 (空速: 1 m/s)
Fig.8 The change of envelope maximum and minimum temperature over time (Airspeed:1 m/s)

2.3 飞艇在 10 m/s 空速下的热特性

在 10 m/s 的空速下, 飞艇囊体内部的氦气平均温度随着热环境的周期变化, 也发生周期性的变化, 如图 9 所示。飞艇在夜间囊体内部的氦气具有较低的温度, 可低于环境温度约 6 K。随着太阳的升起囊内氦气温度会迅速增加, 然后温升速度会逐渐减小, 最终在正午达到 239 K, 即高于环境温度 23 K。飞艇整个昼夜氦气温差达到 29 K。另外, 整个囊体内部的氦气温度, 在不同的时刻具有不同的分布特点, 在正午时温度分布与 1 m/s 空速类似, 如图 10—12 所示。

如图 13 所示, 在驻空高度为 18 km, 空速为 10 m/s 的条件下, 蒙皮昼夜最小温度约为 190 K, 最大温度为 280 K。随着空速的增大, 蒙皮的最小温度会增加, 而蒙皮的最大温度会减小。另外, 空速的增加, 会降低昼夜氦气的温差。空速由 1 m/s 提高到 10 m/s 时, 昼夜氦气的温差会由 46 K 变为 29 K, 降低约 17

K。故空速可作为减缓氦气昼夜温差的一个手段, 从而可减缓氦气温差所导致的超热超冷对囊体强度的影响。

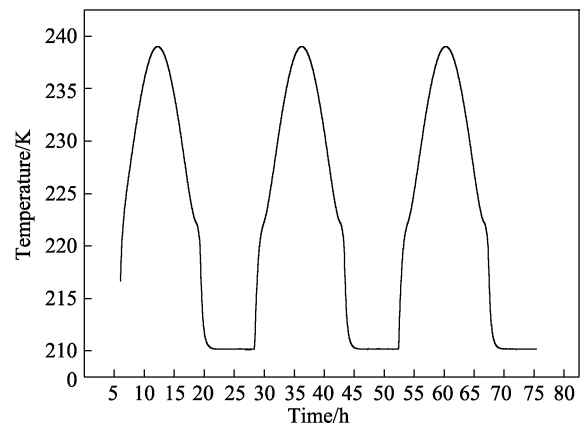


图 9 囊内氦气平均温度随时间的变化 (空速: 10 m/s)
Fig.9 The change of helium average temperature in capsule over time (Airspeed: 10 m/s)

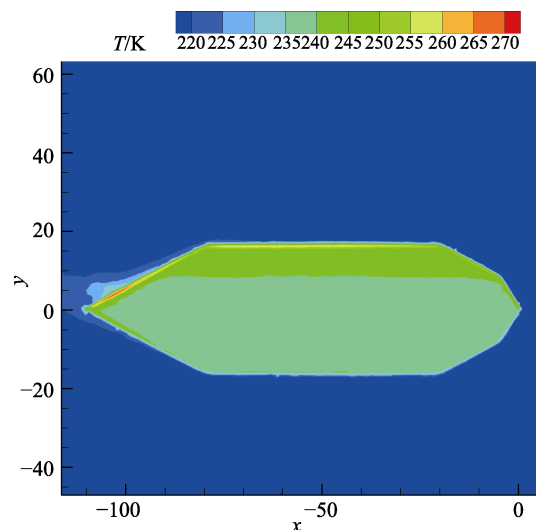


图 10 12 点时的内部氦气温度云图 (空速: 10 m/s)
Fig.10 The helium temperature distribution at 12:00 (Airspeed: 10 m/s)

3 结语

飞艇在平流层驻空期间昼夜周期性变化的热特性会影响其浮力水平、蒙皮应力以及压差和温度耦合下的整艇变形。由于外界热环境的昼夜交替变化, 使得整个囊体及其分布发生显著的变化, 而且氦气温度分布和平均温度也发生显著的变化, 进而影响囊体上的载荷。囊体温度的变化会引起所采用材料的力学特性、承压能力以及体积的显著变化, 从而影响整个飞艇的高度保持和抗风性能。

文中在前人研究的基础上, 基于热源模型和 CFD 数值分析方法, 建立了能够准确分析囊体内部自然对

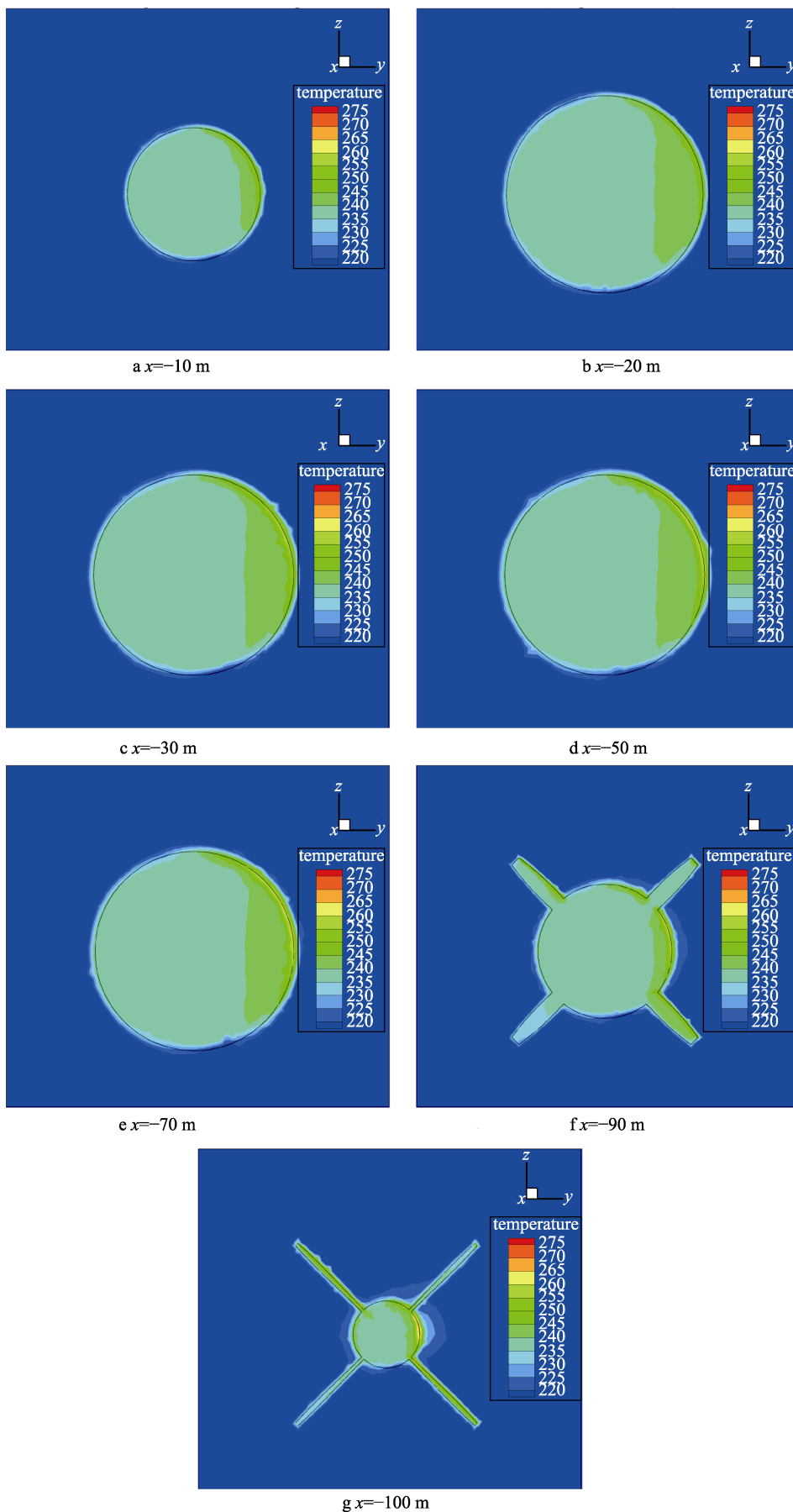


图 11 12 点时的内部氦气温度在不同横截面云图 (空速: 10 m/s)
Fig.11 The helium temperature distribution at 12:00 at different XZ planes (Airspeed: 10 m/s)

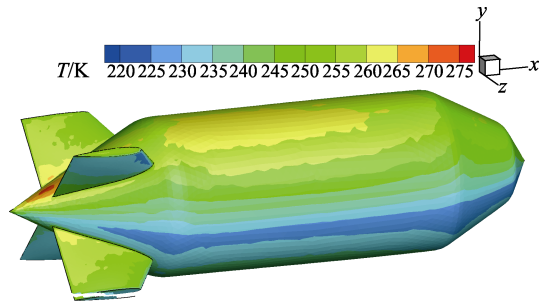


图 12 12 点时的蒙皮温度云图 (空速: 10 m/s)

Fig.12 The envelope temperature distribution at 12:00 (Airspeed:10 m/s)

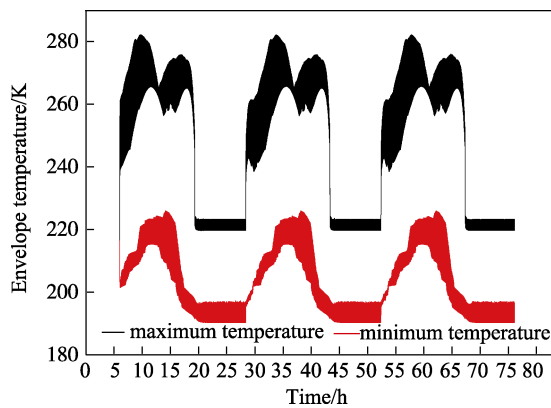


图 13 蒙皮最大最小温度随时间的变化 (空速: 10 m/s)

Fig.13 The change of envelope maximum and minimum temperature over time (Airspeed: 10 m/s)

流以及囊体外部混合对流的热特性分析方法。通过数值仿真分析,得出常规平流层飞艇蒙皮温度昼夜变化特性。在不同的空速下,氦气昼夜温差和蒙皮的最大、最小温度均会发生一定的变化。所建立的热模型以及得出的飞艇热特性数据可为平流层飞艇蒙皮材料的选择及其驻空性能的分析提供参考和指导。

参考文献:

- [1] MANTESCU L. HiSentinel80: Flight of a High Altitude Airship[C]// 11th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations (ATIO) Conference. Virginia Beach, VA, 2011.
- [2] ANDROULAKAKIS S P, JUDY R. Status and Plans of High Altitude Airship (HAATM) program[C]// AIAA Lighter-Than-Air Systems Technology. Florida, 2013.
- [3] OKAYA S. R & D Status of RFC Technology for SPF Airship in Japan[C]// 9th Annual International Energy Conversion Engineering Conference. San Diego, California, 2013.
- [4] LINDSTRAND P. ESA-HALE Airship Research and Development Program[C]// Proceedings of the 2nd Stratospheric Platform Systems Workshop. Tokyo, Japan, 2000.
- [5] ILIEVA G, PÁSCOA J, DUMAS A, et al. MAAT—Promising Innovative Design and Green Propulsive Concept for Future Airship's Transport[J]. Aerospace Science and Technology, 2014, 35: 1-14.
- [6] MILLER J. Update of ATG Stratsat Programme[C]// Proceedings of the 4th Stratospheric Platform Systems Workshop. Tokyo, Japan, 2003.
- [7] WU J, FANG X, WANG Z, et al. Thermal Modeling of Stratospheric Airships[J]. Progress in Aerospace Sciences, 2015, 75: 26-37.
- [8] 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 Xian-de, WANG Wei-zhi, Li Xiao-jian. Preliminary Discussion on Thermal Simulation of Stratospheric Airship[J]. Space Return and Remote Sensing, 2007, 28(2): 5-9.
- [9] 徐向华, 程雪涛, 梁新刚. 平流层飞艇的热数值分析[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2009, 49(11): 1848-1851.
XU Xiang-hua, CHENG Xue-tao, LIANG Xin-gang. Thermal Numerical Analysis of Stratospheric Airships[J]. Journal of Tsinghua University: Natural Science Edition, 2009, 49(11): 1848-1851.
- [10] GARDE G. Thermal Modeling of NASA's Super Pressure Pumpkin Balloon[C]// AIAA Balloon Systems Conference. Williamsburg, VA, 2013.
- [11] 戴秋敏. 飞艇热环境与热特性研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2014.
DAI Qiu-min. Study on Thermal Environment and Thermal Characteristics of Airships[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2014.
- [12] 刘婷婷, 麻震宇, 杨希祥, 等. 太阳能电池对平流层飞艇热特性的影响分析[J]. 宇航学报, 2018, 39(1): 35-42.
LIU Ting-ting, MA Zhen-yu, YANG Xi-xiang, et al. Analysis of the Influence of Solar Cells on the Thermal Characteristics of Stratospheric Airships[J]. Journal of Astronautics, 2018, 39(1): 35-42.